

samk



Satakunnan ammattikorkeakoulu
Satakunta University of Applied Sciences

JUHA MUJUNEN

Kotitalouksien osallistuminen sähkönkulutuksen säätöön

SÄHKÖ- JA AUTOMAATIOTEKNIIKAN
TUTKINTO-OHJELMA
2026

TIIVISTELMÄ

Mujunen, Juha: Kotitalouksien osallistuminen sähkönkulutuksen säätöön
Opinnäytetyö, AMK
Sähkö- ja automaatiotekniikan tutkinto-ohjelma
Helmikuu 2026
Sivumäärä: 96

Tässä opinnäytetyössä selvitettiin, miten suomalaiset kotitaloudet voivat osallistua sähkönkulutuksen säätöön ja kuinka suuri joustopotentialiaali niillä on sähköjärjestelmän näkökulmasta. Lisäksi tarkasteltiin, millaiseksi kotitaloudet kokevat joustoon osallistumisen kuormittavuuden ja mitkä tekijät vaikuttivat hyväksyttävyyteen.

Työ toteutettiin monimenetelmällisesti kirjallisuuskatsauksena, tuntihintadatan analyysinä, tapausesimerkinä sekä kyselytutkimuksena. Sähkön day-ahead-tuntihintoja analysoitiin vuosilta 2020–2025, ja tapausesimerkissä mitattiin pörssihintaperusteisen ohjauksen vaikutuksia omakotitalon lämmitykseen ja sähköauton lataukseen. Kyselyllä kartoitettiin kotitalouksien käytäntöjä, käytettyjä ohjausratkaisuja, ajankäyttöä, koettuja säästöjä sekä esteitä joustoon osallistumiselle.

Tuloksissa todettiin, että sähkön hinnan vaihtelu ja nolla- tai negatiivisten hintojen yleistyminen lisäsivät kannusteita kuormien ajoittamiselle. Tapausesimerkissä lämmityksen ajastuksella saavutettiin vuositasolla selvä kustannus-hyöty, mutta samalla sisälämpötilan vaihtelu kasvoi ja ajoittain myös lämpimän käyttöveden lämpötila aleni. Kyselyssä raportoitiin jonkinasteista optimointia, ja useimmilla optimointi vei vain vähän aikaa eikä sitä koettu merkittävästi kuormittavaksi. Ei-optimointia tekevien näkökulmasta keskeisiksi esteiksi tunnistettiin koettu vähäinen hyöty, ratkaisujen monimutkaisuus sekä asumismukavuuteen liittyvät huolenaiheet.

Johtopäätöksenä todettiin, että kotitalouksien jousto on teknisesti merkittävä resurssi erityisesti lämmityksessä ja sähköauton latauksessa, ja aggregoituna se voi olla mittaluokaltaan relevantti myös kantaverkon tasapainotuksessa. Laaja käyttöönotto edellyttää kuitenkin helppokäyttöisiä ja luotettavia ratkaisuja, jotka ovat läpinäkyviä, vikasietoisia ja käyttäjän hallittavissa mukavuusrajojen ja ohitusmahdollisuuksien kautta.

Avainsanat: kysyntäjousto, kotitaloudet, sähkönhinta, pörssisähkö, lämmitys, sähköautot, automaatio, reservimarkkinat

ABSTRACT

Mujunen, Juha: Household Participation in Electricity Demand Response
Bachelor's thesis
Degree programme in Electrical and Automation Engineering
February 2026
Number of pages: 96

This thesis examined how Finnish households can contribute to electricity demand response and assessed the size of their flexibility potential from a power-system perspective. In addition, perceived effort, user acceptance, and key barriers to participation were evaluated.

The study applied a mixed-methods approach combining a literature review, an analysis of Finnish day-ahead hourly electricity prices (2020–2025), a real-world case study, and a household survey. Price data were analysed to characterise price volatility and the occurrence of zero or negative price hours relevant to load shifting. The case study quantified the impacts of spot-price-based control on a detached house's space heating and electric vehicle (EV) charging. The survey captured current optimisation practices, control solutions, time spent on optimisation, perceived savings, and reasons for non-participation.

The results indicated that increasing price variability and the growing number of zero or negative price hours strengthened incentives for load shifting. In the case study, scheduling space heating produced clear annual cost savings; however, indoor temperature variability increased and domestic hot water temperatures occasionally declined. In the survey, most respondents reported some level of optimisation; for most, it required little time and was not perceived as burdensome. Among non-optimisers, the main barriers were low perceived benefits, solution complexity, and concerns about comfort.

The conclusions suggest that household flexibility is technically significant, especially in space heating and EV charging, and that aggregated capacity can be meaningful for system balancing. However, large-scale adoption requires solutions that are simple, transparent, reliable, fail-safe, and user-controllable through comfort limits and easy override options.

Keywords: demand response, households, electricity price, dynamic pricing, space heating, electric vehicles, automation, balancing reserves

SISÄLLYS

1 JOHDANTO	10
1.1 Tausta ja ajankohtaisuus	10
1.2 Keskeiset käsitteet ja näkökulma	10
1.3 Työn tavoite ja tutkimuskysymykset	11
1.4 Rajaukset	12
1.5 Aineisto ja menetelmät lyhyesti	12
1.6 Työn rakenne	12
1.7 Tekoälyn hyödyntäminen työssä	13
2 SUOMEN SÄHKÖJÄRJESTELMÄ JA MARKKINAYMPÄRISTÖ.....	14
2.1 Verkon rakenne	14
2.2 Toimijat.....	14
2.3 Viimeaikaiset muutokset.....	16
2.4 Säästä riippuvainen tuotanto	17
2.5 Sähkön kokonaishinnan muodostuminen kotitalouksissa.....	18
2.6 Sähkösovimusten tyypit Suomessa.....	19
3 KOTITALOUKSIEN SÄHKÖNKULUTUSPROFIILIT	21
3.1 Kotitalouksien osuus Suomen sähkönkulutuksesta	22
3.2 Määritelmä ja rajaukset	22
3.3 Suomessa asuvien kotitalouksien rakenteet.....	23
3.4 Asuntotyypin vaikutus kotitalouksien sähkönkulutukseen.....	24
3.5 Kodin yksittäisten sähkölaitteiden sähkönkulutus	25
3.6 Sähköauton kotilataus	26
4 SÄHKÖN HINTANALYYSI 2020–2025	28
4.1 Hinnan vuosimuutokset	28
4.2 Sähkönhinnan kuukausimuutokset.....	29
4.3 Nolla- ja negatiiviset tunnit.....	30
4.4 Tuntihintojen vuorokauden sisäinen vaihtelu	31
4.5 Vuorokauden halvin tunti	34
5 TEKNOLOGIAT SÄHKÖNKÄYTÖN JOUSTON MAHDOLLISTAJINA.....	36
5.1 Joustoon soveltuvat kuormat kotitalouksissa.....	37
5.2 Lämmityspäivä, lämmityskausi ja lämmitystarveluku ohjauksen syö- teenä	38
5.3 Ohjaus- ja automaatioteknologiat.....	39
5.4 Energiavarastot ja reservimarkkinoihin kytketyt ratkaisut	40

5.5 Ohjauksen reunaehdot: tarveohjaus, luotettavuus ja käyttäjän hallinta	42
6 TAPAUSESIMERKKI	44
6.1 Perustiedot	44
6.2 Mittalaitteet ja datan keruu	45
6.3 Ohjauslaitteet	45
6.4 Lämmityspäivä ja lämmityskausi	46
6.5 Referenssimittaukset ennen koetta	47
6.6 Lämmityksen päälläoloaika	48
6.7 Taloudellinen hyöty	48
6.8 Kokemukset ja yhteenveto	49
7 KYSELYTUTKIMUS SÄHKÖNKÄYTÖN OPTIMOINNISTA.....	51
7.1 Vastaaajien taustaprofiili ja kotitalouksien energijärjestelmät	52
7.2 Toissijainen lämmitys ja kuormien ajoitus optimointia tekevissä kotitalouksissa.....	53
7.3 Ohjauslaitteet, automaatioalustat ja ratkaisujen luotettavuus	54
7.4 Optimoinnin ajankäyttö, kuormittavuus, asumismukavuus ja säästöt .	55
7.5 Kiinteä hinta, motivaatio ja optimoinnin esteet ei-optimointia tekevien näkökulmasta	56
7.6 Yhteenveto	58
8 TULOKSET JA JOHTOPÄÄTÖKSET	59
8.1 Kerrostaloasunnon potentiaali	59
8.2 Omakotitalon potentiaali	60
8.3 Lämmitysmuodon merkitys säästöpotentiaaliin	61
8.4 Lämmityksen todellisen ja teoreettisen tarpeen erot sekä niiden merkitys ohjauksessa	63
8.5 Toissijaiset lämmitysmuodot.....	64
8.6 Sähköauton latauspotentiaali	64
8.7 Optimoinnin kuormittavuus ja vaikutukset asumismukavuuteen.....	65
8.8 Lämmitysjärjestelmien huippumitoitus ja käyttämätön kapasiteetti jouston lähteenä.....	67
8.9 Kotitalouksien joustopotentiaali kantaverkon tasapainotuksessa	68
8.10 Vastaukset tutkimuskysymyksiin	69
9 POHDINTA	71
9.1 Ehdot laajalle käyttöönnotolle	71
9.2 Luottamus ja palvelumallit	72
9.3 Jatkokehitys ja suositukset	73
9.4 Työn rajoitteet ja tulosten yleistettävyyys	75

9.5 Tapauskohteen jatkokehitys koejakson jälkeen: kohti autonomista ja vi- kasietoista ohjausta	75
9.6 Opinnäytetyöprosessin reflektointi ja oma kehittyminen	76
9.7 Eettiset näkökohdat ja tekoälyn vastuullinen käyttö	78
9.8 Tulosten odotustenmukaisuus ja yllättävät havainnot	79
LÄHTEET	81
LIITE 1 (KOTITALOUKSIEN SÄHKÖNKULUTUS):	88
LIITE 2 (KYSELYTUTKIMUKSEN KYSYMYKSET JA SAATETEKSTI):	90

LYHENTEET

aFRR	Automaattinen taajuuden palautusreservi (automatic Frequency Restoration Reserve)
ALV	Arvonlisävero
BEV	Akkusähköauto (Battery Electric Vehicle)
BRP	Tasevastaava (Balance Responsible Party)
COP	Lämpöpumpun lämpökerroin (Coefficient of Performance)
DIY	Tee-se-itse -ratkaisu (Do It Yourself)
DSR	Kysyntäjousto (Demand-Side Response)
DSO	Jakeluverkonhaltija (Distribution System Operator)
EM3	Thermia-lämpöpumpun EM3-laajennusmoduuli
ENTSO-E	Eurooppalainen kantaverkkoyhtiöiden järjestö (European Network of Transmission System Operators for Electricity)
EV	Sähköauto (Electric Vehicle)
EVU	Lämpöpumpun ulkoinen ohjaustulo / älyverkkotoiminto (Thermia; Smart Grid / EVU)
FCR	Taajuuden vakautusreservi (Frequency Containment Reserve)
FCR-D	Taajuuden vakautusreservi, häiriötilanne (FCR for Disturbances)
FCR-N	Taajuuden vakautusreservi, normaali (FCR for Normal Operation)
FFR	Nopea taajuusreservi (Fast Frequency Reserve)
FI	Suomen hinta-alue / bidding zone (Finland)
HDD	Lämmitystarveluku eli astepäiväluku (Heating Degree Days)
HDDt	Päiväkohtainen lämmitystarveluku
HEMS	Kotitalouden energianhallintajärjestelmä (Home Energy Management System)
HVDC	Korkeajännitteinen tasasähkösiirto (High-Voltage Direct Current)
ISP	Taseselvitysjakso (Imbalance Settlement Period)
K4	Energiaviraston käyttämä kotitalouskulutusluokka siirtomaksuver- tailuissa
mFRR	Manuaalinen taajuuden palautusreservi (manual Frequency Res- toration Reserve)
MRC	Day-ahead-markkinakytkentä (Multi-Regional Coupling)
MTU	Markkina-aikayksikkö (Market Time Unit)

PHEV	Ladattava hybridi (Plug-in Hybrid Electric Vehicle)
S17	Lämmitystarveluku peruslämpötilalla 17 °C
TSO	Siirtoverkonhaltija (Transmission System Operator)
VPP	Virtuaalivoimalaitos (Virtual Power Plant)

TERMIT JA NIIDEN MÄÄRITELMÄT

Alassäätö

- Säättösähkömarkkinoilla tai reservien aktivoinnissa tehtävä toimenpide, jossa sähköjärjestelmästä poistetaan tehoa: tuotantoa vähennetään tai kulutusta lisätään. Fingrid käyttää allassäätöä, kun järjestelmässä on tehoylijäämää.

Day-ahead-markkina

- Seuraavan vuorokauden tuntikohtaisen sähköenergian markkina, jossa hinnat muodostuvat tyypillisesti edeltävänä päivänä annettujen tarjousten perusteella.

Inertia

- Sähköjärjestelmään kytkeytyneiden pyörivien massojen liike-energia, joka vaimentaa taajuusmuutoksia. Pienen inertian tilanteissa taajuus voi muuttua nopeammin ja reservien tarve korostuu.

Ohitus

- Käyttäjän mahdollisuus ohittaa automaatio helposti (tilapäisesti tai pysyvästi), jotta hallinnan tunne ja asumismukavuus säilyvät.

Reaktanssi (psykologinen)

- Motivaatiotila, joka syntyy, jos henkilö kokee vapautensa tai päätäntävällän kaventuvan. Se voi ilmetä vastustuksena, ohjeiden uhmaamisena tai haluna palauttaa kontrolli (esim. jos automaatio muuttaa lämpötilaa ilman selitystä).

Sulakevahti

- Ohjauslogiikka, joka valvoo pääsulake- tai vaihevirtoja ja rajoittaa/katkaisee kuormia (esim. auton lataus tai lämmitys) ylikuormituksen estämiseksi.

Ylössäätö

- Säättösähkömarkkinoilla tai reservien aktivoinnissa tehtävä toimenpide, jossa sähköjärjestelmään tuodaan lisää tehoa: tuotantoa lisätään tai kulutusta vähennetään. Fingrid käyttää ylössäätöä, kun järjestelmässä on tehonpuutetta.

1 JOHDANTO

1.1 Tausta ja ajankohtaisuus

Suomen sähköjärjestelmä on viime vuosina muuttunut nopeasti. Säästä riippuvan tuotannon (tuuli ja aurinko) kasvu, kulutuksen sähköistyminen (esimerkiksi lämmitys ja liikenne) sekä markkinarakenteiden kehittyminen ovat lisänneet tarvetta joustolle: sähköjärjestelmän tasapainoa on ylläpidettävä myös tilanteissa, joissa tuotanto ja kulutus vaihtelevat nopeasti. Kotitaloudet muodostavat tässä kokonaisuudessa merkittävän mutta käytännön toteutukseltaan haastavan joustoresurssin, koska kuormat ovat hajautuneita, käyttäjäkohtaisia ja asumismukavuuteen sidoksissa.

Tämän opinnäytetyön aiheena on kotitalouksien osallistuminen sähkönkulutuksen säätöön Suomessa. Työssä tarkastellaan kotitalouksien joustoa sekä teknisenä että käytännöllisenä kokonaisuutena: mitä kuormia voidaan ohjata, miten ohjaus toteutetaan arjessa ja mitkä reunaehdot (mukavuus, luotettavuus ja ajankäyttö) määrittävät ratkaisujen käyttöönoton laajuutta. Lisäksi arvioidaan, miten käytetty aika ja saavutettu hyöty vaikuttavat kiinnostukseen ja hyväksyttävyyteen.

Aihe liittyy sähkö- ja automaatiotekniikan osaamiseen, jossa yhdistyvät mitaus, ohjaus, tiedonvälitys ja järjestelmäintegraatio. Samalla aihe kytkeytyy käytännön toteutukseen: joustoratkaisujen yleistyessä tarvitaan tietoa siitä, miten ratkaisut saadaan toimimaan luotettavasti ja hyötyä tuottavasti erilaisissa kotitalouksissa.

1.2 Keskeiset käsitteet ja näkökulma

Tässä työssä kotitalouksien joustolla tarkoitetaan sähkönkulutuksen ajallista muuttamista (kuormien siirtämistä, rajaamista tai hetkellistä keskeyttämistä) siten, että kotitalous voi reagoida esimerkiksi hintasignaaleihin tai järjestelmän

tarpeisiin. Jousto voi kohdistua sekä suuriin yksittäisiin kuormiin (kuten tilojen ja käyttöveden lämmitykseen tai sähköauton lataukseen) että pienempiin ohjattaviin kulutuskohteisiin.

Kotitalouksien joustoa tarkastellaan teknisenä ja käytännöllisenä kokonaisuutena. Tarkastelu kattaa ohjattavat kuormat, arjessa käytettävät ohjaustavat sekä reunaehdot – mukavuuden, luotettavuuden ja ajankäytön – jotka määrittävät, kuinka laajasti ratkaisuja voidaan ottaa käyttöön.

1.3 Työn tavoite ja tutkimuskysymykset

Työn tarkoituksena on selvittää, miten kotitaloudet voivat osallistua sähkönkulutuksen säätöön Suomessa ja mikä on niiden joustopotentiali sähköjärjestelmän näkökulmasta. Tavoitteena on myös ymmärtää, miten kotitaloudet kokevat joustoon osallistumisen kuormittavuuden ja mitkä tekijät vaikuttavat jouston hyväksyttävyyteen.

Työn keskeiset tavoitteet ovat:

- kuvata kotitalouksien jouston taustaa sähköjärjestelmän ja sähkömarkkinoiden muutosten kautta sekä perustella, miksi joustolle on kasvava tarve
- arvioida kotitalouksien joustopotentialia teknisestä ja taloudellisesta näkökulmasta eri asumismuodoissa ja eri kuormilla (esim. lämmitys ja sähköauton lataus)
- tarkastella tapausesimerkin avulla käytännön ohjausta: miten mittaukset ja ohjausratkaisut toimivat, miten ne vaikuttavat asumismukavuuteen ja millaista hyötyä voidaan saavuttaa
- selvittää kyselytutkimuksen avulla kotitalouksien kokemuksia joustosta, kuten kuormittavuutta, ajankäyttöä, motivaatiota ja yleisimpiä esteitä
- tuottaa johtopäätöksiä ja käytännönläheisiä suosituksia, joita voidaan hyödyntää joustoratkaisujen kehittämisessä, tuotteistamisessa ja käytönotossa

Työssä pyritään vastaamaan erityisesti seuraaviin tutkimuskysymyksiin:

- millä teknisillä ja käytännön keinoilla kotitaloudet voivat osallistua sähkönkulutuksen säätöön?
- kuinka suuri kotitalouksien joustopotentiali voi olla valtakunnallisesti ja miten se vaihtelee kuormien ja asumismuodon mukaan?
- miten kuormittavaksi jousto koetaan ja miten se vaikuttaa halukkuuteen osallistua?
- millaiset teknologiat ja toimintamallit tukevat parhaiten laajaa käyttöön-ottoa?

1.4 Rajaukset

Työ rajautuu Suomen kotitalouksiin ja kotitalouksille tyypillisiin ohjattaviin kuormiin. Tarkastelu painottuu joustoon, jota voidaan toteuttaa ilman merkittävää asumismukavuuden heikkenemistä. Työn tavoitteena ei ole suunnitella yksityiskohtaista laite- tai järjestelmästandardia, vaan arvioida jouston mahdollisuuksia ja käyttöönoton ehtoja kotitalousympäristössä. Taloudellisissa vertailuissa painopiste on energiahinnan vaihtelussa; siirtomaksut, verot ja perusmaksut huomioidaan vain erikseen määritellyissä tarkasteluissa.

1.5 Aineisto ja menetelmät lyhyesti

Tutkimus toteutettiin monimenetelmällisesti kirjallisuuskatsauksen, kvantitatiivisen data-analyysin, tapausesimerkin sekä kyselytutkimuksen avulla. Aineistona käytettiin tuntikohtaista sähkön hintadataa vuosilta 2020–2025, tapauskohteesta kerättyä mittausdataa sekä kyselyaineistoa (N = 279; 11.–30.11.2025). Hintadataa analysoitiin vuorokauden sisäisten hintaerojen sekä nolla- ja negatiivisten hintojen kautta, ja tapausesimerkissä arvioitiin pörssihintaperusteisen ohjauksen vaikutuksia lämmitykseen ja lataukseen.

1.6 Työn rakenne

Työ etenee siten, että ensin kuvataan sähköjärjestelmän ja markkinoiden taustaa sekä jouston merkitystä. Tämän jälkeen tarkastellaan jouston

mahdollistavia teknologioita ja kotitalouskuormia sekä analysoidaan hintadataa jouston kannalta relevanttien ilmiöiden näkökulmasta. Seuraavaksi esitellään tapausesimerkki ja arvioidaan käytännön ohjauksen vaikutuksia. Kyselytutkimuksen tulokset täydentävät kokonaiskuvaa kotitalouksien kokemuksista ja käyttöönoton esteistä. Lopuksi tulokset kootaan johtopäätöksiksi ja pohdinnaksi.

1.7 Tekoälyn hyödyntäminen työssä

Tässä opinnäytetyössä on hyödynnetty generatiivista tekoälyä (ChatGPT 4.2–5.2, OpenAI) rajatusti ideoinnin tukena, tiedonhaun jäsentämisessä sekä tekstin kieliasun selkeyttämisessä. Lisäksi tekoälyä on käytetty englanninkielisen tiivistelmän käännöksen apuna. Data-analyysia varten on tuotettu tekoälyn avulla Python-ohjelmia, jotka on tarkoituksella toteutettu pieniksi ja tarkasti rajatuiksi yksittäisiin laskentoihin, jotta laskentaketju säilyy läpinäkyvänä ja helposti todennettavana. Ohjelmien tuottamat tulokset on tarkastettu satunnaisotannalla ja varmistettu laskemalla tuloksia myös toisella tavalla; esimerkiksi suuret on ensin laskettu vuorokausitasolla, josta ne on johdettu kuukausi- ja vuositason tuloksiksi erillisinä ja tarkistettavina vaiheina. Tekoäly ei toimi tieteellisenä alkuperäislähteenä, vaan työssä esitetyt väitteet perustuvat alkupe- räislähteisiin. Kirjoittaja vastaa esitetyn sisällön oikeellisuudesta, eettisyydestä ja tietosuojan huomioimisesta.

2 SUOMEN SÄHKÖJÄRJESTELMÄ JA MARKKINAYMPÄRISTÖ

Tässä luvussa kuvataan Suomen sähköjärjestelmän perusrakenne, keskeiset toimijat sekä viimeaikaiset markkina- ja sääntelymuutokset, jotka vaikuttavat kotitalouksien mahdollisuuksiin osallistua sähkönkulutuksen joustoon. Luvun tavoitteena on muodostaa kokonaiskuva siitä, miten sähkö toimitetaan tuotannosta kulutukseen, miten markkinaosapuolet ja tiedonvaihto järjestyvät sekä miten järjestelmämuutokset (erityisesti tuuli- ja aurinkovoiman kasvu) heijastuvat hintavaihteluun ja jouston tarpeeseen.

2.1 Verkon rakenne

Suomen sähköjärjestelmä jakautuu kantaverkkoon, alue- ja jakeluverkkoihin sekä asiakasliityntöihin. Kantaverkon omistaa ja sitä operoi Fingrid. Kantaverkko muodostuu 400, 220 ja 110 kV:n jännitetasoilla toimivista siirtojohdoista ja sähköasemista. Vuonna 2023 kantaverkossa oli noin 14 500 km voimajohtoja ja yli 120 sähköasemaa; pituus jakautui noin 5 400 km (400 kV), noin 1 000 km (220 kV) ja noin 7 600 km (110 kV) sekä lisäksi noin 320 km HVDC-yhteyksiä (Fingrid, n.d.-a, kohta Kantaverkko).

Kantaverkosta sähkö siirtyy alueellisesti suurjännitteisiin jakeluverkkoihin (110 kV) ja edelleen jakeluverkkoihin, joissa käytetään 20, 10, 1 tai 0,4 kV:n jännitetasoja. Jännitetasot luokitellaan tyypillisesti siten, että pienjännite on enintään 1 kV, keskijännite 1–36 kV ja suurjännite 110–400 kV. Kotitaloudet liitetään yleensä jakeluverkkoon, kun taas suuremmat sähkönkäyttäjät voivat liittyä jakeluverkkoon, suurjännitteiseen jakeluverkkoon tai kantaverkkoon kohteen koon ja tarpeen mukaan. (Energiateollisuus, n.d.-b, kohta Sähköverkkojen rakenne.)

2.2 Toimijat

Suomen sähköjärjestelmässä keskeiset roolit jakautuvat kantaverkonhaltijalle, jakeluverkonhaltijoille, markkinatoimijoille sekä vähittäismarkkinoiden

tiedonvaihdon palveluoperaattorille. Kantaverkonhaltijana Fingrid vastaa kantaverkon käytöstä ja kehittämisestä sekä tuotannon ja kulutuksen reaaliaikaisesta tasapainottamisesta. Tasapainon ylläpitoa varten Fingrid hankkii reservituotteita markkinaehtoisesti ja järjestää reservimarkkinat (FCR, aFRR, mFRR, FFR), mikä luo kannusteita myös kulutus- ja varastojoustojen hyödyntämiseen (Fingrid, n.d.-a; Fingrid, n.d.-c.)

Vähittäismarkkinoiden tiedonvaihdon ydin on Fingridin ylläpitämä Datahub, sähkön vähittäismarkkinoiden keskitetty tiedonvaihtojärjestelmä, johon tallennetaan tietoa noin neljästä miljoonasta sähkökäyttöpaikasta. Datahubin tietoja hyödyntävät vähittäismarkkinoiden toimijat (jakeluverkonhaltijat, sähkömyyjät ja palveluntarjoajat), ja tiedot ovat järjestelmässä niihin oikeutettujen osapuolten saatavilla tietoturvallisesti ja ajantasaisesti. (Fingrid, n.d.-d.) Lopputyöntekijä voi tarkastella omia sähkökäyttöpaikka-, sopimus- ja kulutustietojaan datahubin asiakasportaalissa. Portaalissa näkyvät voimassa olevat sähkösopimukset sekä datahubin tietoihin annetut valtuutukset, ja käyttäjä voi tarvittaessa valtuuttaa esimerkiksi energiapalveluntarjoajan tai sähkömyyjän saamaan sähkökäyttöön liittyviä tietojaan datahubista palvelun tai tarjouksen tuottamista varten. (Fingrid, n.d.-e.)

Jakeluverkonhaltijoilla (DSO) on maantieteelliset vastuualueensa ja lakisääteiset velvollisuutensa verkon ylläpidosta, kehittämisestä ja liittämispalveluista. Sähkömarkkinalain mukaan verkonhaltijalla on liittämisvelvollisuus: sen on pyynnöstä ja kohtuullista korvausta vastaan liitettävä verkkoonsa tekniikan ehdot täyttävät käyttöpaikat ja tuotantolaitokset (Sähkömarkkinalaki 588/2013, 4 luku 20 § 1 mom.). DSO-toimintaa sekä hinnoittelun kohtuullisuutta valvoo Energiavirasto, joka on vahvistanut valvontamenetelmät jaksoille 2024–2031 (Energiavirasto, 2023, s. 5).

Markkinatoimijoista sähkömyyjät tarjoavat vähittäistuotteita kotitalouksille. Sähkön tukkukauppaa käydään sekä kahdenvälisinä sopimuksina että sähköpörssissä; Pohjoismaissa keskeinen pörssikanava on Nord Poolin day-ahead- ja intraday-markkina (Nord Pool, n.d.-b; Nord Pool, n.d.-c). Pörssisähkön day-ahead-kaupassa tarjousalueiden välinen kaupankäynti ja hinnanmuodostus kytkeytyvät siirtoverkon rajoitteisiin: kantaverkkoyhtiöt (TSO) määrittävät tarjousalueiden väliset siirtokapasiteetit ja julkaisevat ne seuraavalle päivälle,

minkä jälkeen kapasiteetti allokoidaan markkinakytkennässä (implicit auction / MRC) osana day-ahead-hinnanlaskentaa (Nord Pool, n.d.-d). Taseselvityksestä vastaa Pohjoismaissa yhteinen taseselvitysyhtiö eSett, joka laskee ja selvittää tasevastaavien (BRP) tasepoikkeamat yhtenäisillä periaatteilla Suomessa, Ruotsissa, Norjassa ja Tanskassa. (eSett, 2025, s. 8).

Kotitalouksien jouston kaupallistamisessa keskeisiä ovat aggregaattorit, jotka yhdistävät useiden käyttöpaikkojen joustoa ja tarjoavat sen markkinoille yhtenä kokonaisuutena (Fingrid, 2025b, s. 4). Aggregoinnin merkitys korostuu erityisesti reservimarkkinoilla, koska reservituotteille on asetettu vähimmäistarjouskokoja (esim. 0,1–1 MW) ja nopeita aktivointiaikoja (sekuntien ja minuuttien mittaluokassa) (Fingrid, 2024a, s. 6).

2.3 Viimeaikaiset muutokset

Viime vuosien markkina- ja sääntelyuudistukset ovat tarkentaneet hinnanmuodostusta ja helpottaneet jouston kaupallista hyödyntämistä myös pienissä resursseissa. Pohjoismaisessa taseselvityksessä taseselvitysjakso (imbalance settlement period, ISP) lyheni 60 minuutista 15 minuuttiin 22.5.2023, kun eSett otti varttitason käyttöön tasepoikkeamien laskennassa ja taseselvityksessä (eSett, 2023, s. 6, 8). Muutos tukee siirtymää kohti varttitason sähkömarkkinaa ja tekee tasepoikkeamien tarkastelusta ajallisesti täsmällisempää. Käyttöön-otossa sovellettiin siirtymäratkaisua, jossa epätasapainohinta oli vielä sama kaikissa neljässä vartissa tunnin sisällä ja epätasapainomaksu netotettiin tuntitasolla (hourly netted imbalance fee), kunnes 15 minuutin hintatiedot ovat laajemmin käytössä (eSett, 2023, s. 4, 8). Päivänsisäisessä kaupassa rajat ylittävä 15 minuutin kaupankäynti käynnistyi 18.3.2025 (energian toimituspäivälle 19.3.) (Fingrid, 2025a). Lisäksi day-ahead-markkinan 15 minuutin market time unit (MTU) otettiin käyttöön 30.9.2025 (ensimmäinen kaupankäyntipäivä; toimituspäivä 1.10.2025), mikä yhdenmukaistaa tuotteet taseen resoluutioon ja lisää tarvetta automaattisille ohjauksratkaisuille, jos joustoa halutaan kohdistaa lyhyille jaksoille (Nord Pool, 2025).

Aluehintojen muodostumisen kannalta merkittävä muutos oli flow-based-hintakytkennän käyttöönotto Pohjoismaiden day-ahead-markkinalla 29.10.2024

(Nord Pool, 2024). Uusi kapasiteetinlaskenta hyödyntää siirtoverkkoa aiempaa tehokkaammin ja voi kasvattaa siirtokapasiteetin käyttöä, mikä heijastuu aluehintojen muodostumiseen ja parantaa uusiutuvan tuotannon integraatiota (Nord Pool, n.d.-a).

Kotimaisessa sääntelyssä itsenäisen aggregoinnin pelisääntöjä on täsmennetty. Energiavirasto vahvisti 2.4.2025 korvausmenetelmän, jolla hyvitetään itsenäisen aggregaattorin aktivoinneista aiheutuvia kustannuksia avoimelle toimittajalle ja tasevastaavalle (Energiavirasto, 2025a, s. 1, 8). Päätöksen valmistelussa hyödynnettiin Fingridin itsenäisen aggregoinnin työryhmän loppuraporttia (Energiavirasto, 2025a, s. 6; Fingrid, 2025b, s. 23–24). Päätös mataltaa markkinoillepääsyn esteitä pienille resurssijoukoille ja selkeyttää kustannusten kohdentumista.

2.4 Säästä riippuvainen tuotanto

Viime vuosien suurin rakenteellinen muutos Suomen sähköjärjestelmässä on säästä riippuvan tuuli- ja aurinkosähkön nopea kasvu. Vuoden 2024 lopussa Suomessa oli tuulivoimaa 8,36 GW (Energiateollisuus, n.d.-a). Tilastokeskuksen ennakkotietojen mukaan tuulivoiman tuotanto oli 19,9 TWh ja aurinkovoiman 1,2 TWh vuonna 2024, ja fossiilittoman (ydin-, tuuli-, vesi- ja aurinkovoima sekä uusiutuvat polttoaineet) sähkön osuus nousi 95 %:iin (Tilastokeskus, 2025a). Uusiutuvan tuotannon matala rajakustannus näkyy hinnanmuodostuksessa merit order -vaikutuksena: erityisesti runsaan tuuli- ja aurinkotuotannon tilanteissa tarjontakäyrä siirtyy ja markkinahinta painuu useammin alemmas (Nord Pool, n.d.-e, kohta "Impact of renewable energy"). Samalla tuntihinnan vaihtelu on kasvanut: tuulisina päivinä hinta on usein lähellä nollaa ja negatiivisten sekä nollahintaisten tuntien määrä on kasvanut voimakkaasti (Energiateollisuus, 2024, s. 7–8). Kylminä ja vähätuulisina jaksoina tehotilanne voi kiristyä ja hinnat nousta, jos kotimainen tuotanto ja tuonti eivät riitä kattamaan kulutusta; Fingrid nostaa esiin erittäin kylmän ja tyynen (vähätuulisen) tilanteen hankalimpana riittävyyden kannalta ja korostaa kulutusjoustojen roolia (Fingrid, 2024b).

Sääriippuvuus kytkeytyy myös järjestelmäfyysiikkaan: inertia tarkoittaa sähköjärjestelmään kytkeytyneisiin pyöriin massoihin varastoitunutta liike-energiaa ja sen kykyä vastustaa taajuuden muutoksia; inertian ollessa pieni suuri vika aiheuttaa suuremman hetkellisen taajuusmuutoksen. Pienen inertian tilanteissa pohjoismaiset kantaverkkoyhtiöt hankkivat nopeaa taajuusreserviä taajuuden hallinnan varmistamiseksi. Pohjoismaissa tähän on vastattu myös nopealla taajuusreservillä (FFR), jota hankitaan nimenomaisesti pienen inertian tilanteiden hallintaa varten; taajuusmuutoksen suuruus riippuu inertian lisäksi reservien aktivoitumisnopeudesta ja FFR-tarve vaihtelee inertian mukaan. (Fingrid, n.d.-f.) FFR aktivoituu automaattisesti taajuusmittaukseen perustuen, eikä Fingrid lähetä ohjaussignaalia. Reserviteho on aktivoitava täysimääräisesti enintään 0,7–1,3 sekunnissa aktivointivaihtoehdon mukaan, mikä korostaa nopeasti reagoivien resurssien soveltuvuutta FFR-tuotteeseen. (Fingrid, 2023a, s. 5).

2.5 Sähkön kokonaishinnan muodostuminen kotitalouksissa

Kotitalouden sähkön kokonaishinta muodostuu sähköenergian hinnasta, sähkön siirrosta sekä veroista. Sähköenergian hinta määräytyy sähkösopimuksen mukaan; esimerkiksi muuttuvahintaisissa sopimuksissa hinta voi perustua pörssihintaan. Sähkön siirto on paikallisen jakeluverkonhaltijan perimä maksu, eikä sen hintaa voi kilpailuttaa. Siirtomaksulla katetaan sähkön toimittaminen asiakkaalle sekä jakeluverkon ylläpito ja kehittäminen. Lisäksi laskuun sisältyy veroja ja arvonlisävero. (Energiavirasto, n.d.-a, kohdat Sähköenergia, Sähkön siirto, Verot.)

Energiaviraston selvityksen perusteella sähkön siirtomaksujen taso vaihtelee Suomessa huomattavasti verkkoalueittain. Tyypillisellä kotitalouskulutuksella (K4, 5 000 kWh/v) verkkoyhtiöiden välinen vaihtelu on suuri: veroton vuosikustannus on ollut noin 138–602 euroa verkkoyhtiöstä ja käytössä olevasta siirto tuotteesta riippuen. (Energiavirasto, 2025b, s. 14.)

Yksittäisten verkkoyhtiöiden hinnastot havainnollistavat vaihtelua myös energiamaksun tasolla. Keravan Energian hinnastossa yleissähkön energiamaksu on 2,60 snt/kWh, ja hinnat ilmoitetaan arvonlisäverollisina. (Keravan Energia,

n.d., kohta Hinnat 1.4.2025 alkaen). Kajaven verkkopalveluhinnastossa yleissiirron energiamaksu on 5,50 snt/kWh ja hinnat sisältävät arvonlisäveron 25,5 %. (Kajave, 2026, s. 2).

Sähkölaskuun sisältyy sähkönkulutukseen perustuva sähkövero, joka määräytyy sähkön käyttötarkoituksen mukaisen veroluokan mukaan. Kotitalouksien käyttämä sähkö kuuluu tyypillisesti veroluokkaan I, jossa energiaveron taso on 2,24 snt/kWh ja lisäksi peritään huoltovarmuusmaksu 0,013 snt/kWh (yhteensä 2,253 snt/kWh). (Verohallinto, n.d., kohta Verotaulukko 2: Sähkö – veroluokka I.)

2.6 Sähkösopimusten tyypit Suomessa

Energiaviraston mukaan kotitalouksille tarjotaan sähkösopimuksia kestoaltaan toistaiseksi voimassa olevina tai määräaikaisina. Toistaiseksi voimassa oleva sopimus on voimassa, kunnes se irtisanotaan, ja myyjä voi muuttaa sopimusehtoja ja hintoja ilmoitusajalla. Määräaikaisessa sopimuksessa sähköstä sovietaan ennalta määrätyksi ajaksi, joka sitoo sekä ostajaa että myyjää, ja tyypillisesti sopimus on yhden tai kahden vuoden mittainen. (Energiavirasto, n.d.-b, kohta Sopimuksen kesto.)

Hinnoittelumallin näkökulmasta sopimukset voidaan jäsentää kiinteähintaisiin, muuttuvahintaisiin ja hybridisopimuksiin. Kiinteähintaisessa sopimuksessa hinta sovitaan etukäteen eikä se muutu sopimusjakson aikana, mikä parantaa ennustettavuutta. Muuttuvahintaisessa sopimuksessa hinta perustuu muuttuvaan tekijään, kuten pörssihintaan; tällöin kuluttaja kantaa hintavaihtelun riskin, mutta voi hyötyä ajoittamalla joustavaa kulutusta edullisemmille tunneille. Hybridisopimus yhdistää kiinteän osuuden ja kulutuksen ajoituksesta riippuvan osuuden (kulutusvaikutus), joka määräytyy sen perusteella, miten kulutus painottuu tuntikohtaisille pörssihinnoille. (Energiavirasto, n.d.-b, kohta Hinnoittelumalli.)

Vuoden 2024 lopussa sähkön vähittäismyyntisopimuksista noin 33 % oli pörssisähkösopimuksia, 45 % määräaikaisia ja 22 % toistaiseksi voimassa olevia. (Energiavirasto, 2025c).

Kuluttajakäyttäytymistä kuvaavat kyselyt tukevat tulkintaa, että osa kotitalouksista hyödyntää pörssihintaa aktiivisesti, mutta kaikille optimointi ei ole mielekäs toimintatapa. Oomin Norstatilla teettämän Sähköbarometri 2025 -kyselyn mukaan 38 % suomalaisista pyrkii optimoimaan sähkön käyttöä pörssihinnan mukaan, kun taas 46 % ei halua nähdä vaivaa hinnan seuraamiseksi tai kulutuksen ajoittamiseksi. (Oomi, n.d.).

3 KOTITALOUKSIEN SÄHKÖNKULUTUSPROFIILIT

Tässä luvussa tarkastellaan kotitalouksien roolia Suomen sähkökäytössä, kulutuksen rakenteellisia eroja asuntotyypeittäin sekä arjen laite- ja aikaprofiileja, joilla on merkitystä kysyntäjoustossa. Tarkastelu nojaa ensisijaisesti Tilastokeskuksen virallisiin tilastoihin ja käsitteistöön, joita täydennetään Motivan kokoamalla käyttökohdejaoilla (esim. lämmitys, lämmin käyttövesi, saunominen sekä laitteet ja valaistus) sekä energia-alan toimijoiden ja energianeuvonnan esittämillä laitekohtaisilla kulutusarvioilla. Koska virallista ja yhtenäistä asuntotyyppikohtaista sähkönkulutustilastoa ei ole saatavilla, asuntotyyppien välisiä eroja havainnollistetaan koontitaulukolla, joka on koottu alan toimijoiden julkaisemista arvioista.

Lähtökohtana on, että kotitaloussektorin osuus sähkön kokonaiskulutuksesta on suuruusluokaltaan noin 30 %, mutta kulutusprofiilit poikkeavat huomattavasti rakennustyyppin ja lämmitysmuodon mukaan. Tässä työssä sähköauton kotilatausta tarkastellaan erillisenä teemana, koska sen ajallinen ohjattavuus ja skaalautuva vaikutus kysyntäprofiileihin ovat kuormanhallinnan kannalta olennaisia; erityisesti ilta- ja yöaikaan painottuva lataus muuttaa tuntikuormitusta ja joustopotentialia.

Ajallisen ohjattavuuden kannalta on hyödyllistä erottaa toisistaan energiankulutus (kWh) ja teho (kW). Vuositason energiankulutus kuvaa mittakaavaa ja käyttökohteiden suhteellisia osuuksia, mutta kysyntäjoustossa ratkaisevaa on, kuinka suuri osa kuormasta voidaan siirtää tunneilta toisille (kW) ja kuinka paljon energiaa siirtyy (kWh) ilman, että asumismukavuus tai arjen toimivuus heikkenee. Suomessa kotitalouksien kuormitus painottuu usein aamu- ja iltatunteihin, ja kausivaihtelu korostuu talvella lämmityksen vuoksi. Tässä luvussa kuvattu kuormarakenne ja ajastettavuus luovat perustan seuraavan luvun hin-
tadataan perustuvalla tarkastelulla.

3.1 Kotitalouksien osuus Suomen sähkönkulutuksesta

Tilastokeskuksen Energian hankinta ja kulutus -tilaston StatFin-tilauksen 12vm (Sähkön kulutus sektoreittain, 1960–2024) mukaan Suomen sähkön kokonaiskulutus oli vuonna 2024 yhteensä 83 053 GWh. Koti- ja maataloussektorin kulutus oli 23 633 GWh, mikä vastasi 28,5 % sähkön kokonaiskulutuksesta. Tilastossa kotitaloudet esitetään yhdessä maatalouden kanssa (”koti- ja maataloudet”) Tilastokeskuksen sektoriluokitusta noudattaen. (Tilastokeskus, 2025f, StatFin-tilaukko 12vm, vuosi 2024.)

Tilastokeskuksen mukaan kotitalouksien suoraan käyttämä sähkö väheni selvästi vuosina 2017–2023 (Tilastokeskus, 2024). Ennakkotietojen perusteella kotitalouksien ja maatalouden yhteenlaskettu sähkönkulutus kääntyi vuonna 2024 jälleen nousuun, ja Motivan koosteen mukaan kasvu oli noin 5 % edellisvuoteen verrattuna (Motiva, 2025a).

3.2 Määritelmä ja rajaukset

Tässä työssä kotitalouksien sähkönkulutuksella tarkoitetaan asumiseen liittyvän energiankäytön sähköosuutta: asuinrakennusten tilojen lämmitystä, käyttöveden lämmitystä, saunomista sekä kotitalouslaitteiden ja valaistuksen sähkönkäyttöä. Rajaus nojaa Tilastokeskuksen käsitteistöön asumisen energiankulutuksesta, jonka mukaan asumisen energiankulutukseen luetaan edellä mainittujen lisäksi esimerkiksi ruoanvalmistukseen käytetty kaasu sekä saunoissa käytettävä puu ja sähkö, mutta kotitalouksien liikenteeseen liittyvä energiankäyttö (esim. yksityisautot ja niiden energian käyttö) ei sisälly asumisen energiankulutukseen, vaan liikenteen energiankulutukseen. (Tilastokeskus, n.d.-a, kohta Määritelmä 1.)

Motivan tilastoyhteenvedon mukaan kotitalouksien sähkönkulutus oli vuonna 2023 noin 22 TWh. Kotitalouksien energian loppukäyttö (kaikki energialajit) jakautui käyttökohteittain seuraavasti: tilojen lämmitys 61 %, käyttöveden lämmitys 16 %, saunat 5 %, valaistus ja sähkölaitteet 13 % sekä vapaa-ajan asunnot 5 %. (Motiva, 2025b, kohta Kotitaloudet). Näitä käyttökohteitä hyödynnetään tässä työssä jäsentämään, mihin kotitalouksien energiankäyttö

pääosin kohdistuu ja mitkä kuormat ovat kysyntäjoustop kannalta keskeisiä. Huomioitavaa on, että Tilastokeskuksen sektorijaossa kotitaloudet ja maatalous esitetään yhdessä, kun taas Motivan kooste koskee kotitalouksia, mikä selittää lukujen eroja. (Tilastokeskus, 2025f, StatFin-tilaus 12vm, vuosi 2024; Motiva, 2025b).

Koska tilojen ja käyttöveden lämmitys muodostavat kotitalouksien energiankäytöstä suurimman osuuden, juuri lämmitykseen liittyvillä kuormilla on käytännössä suurin vaikutus myös tuntitasolla toteutettavaan joustoon. Lämmityskuorman ohjattavuus ei kuitenkaan tarkoita jatkuvaa "pois päältä" -tilaa, vaan lyhyitä ajallisia siirtoja ja ajoituksia, joissa huomioidaan sisälämpötilan ja käyttöveden vähimmäisrajat. Lämmityksen ohjauslogiikkaa ja jouston toteutustapoja käsitellään tarkemmin myöhemmässä teknologiaaluvussa, jotta tässä luovassa voidaan keskittyä kulutuksen mittakaavaan ja rakenteeseen.

3.3 Suomessa asuvien kotitalouksien rakenteet

Vuoden 2024 lopussa Suomessa oli 2 860 961 asuntokuntaa. Talotyypeittäin asuntokunnista 48,3 % asui kerrostaloissa (1 382 453), 37,0 % omakoti- ja paritaloissa (1 058 530), 13,2 % rivitaloissa (378 890) ja 1,4 % muissa rakennuksissa (41 088) (Tilastokeskus, 2025d, StatFin-tilaus 116a, vuosi 2024, KOKO MAA). Näin ollen asuntokunnat painottuvat selvästi kerrostaloihin.

Kesämökkejä Suomessa oli vuoden 2024 lopussa 495 145 (Tilastokeskus, 2025e, StatFin-tilaus 116j, vuosi 2024, KOKO MAA).

	KOKO MAA				
	Asuntokuntia				
	Kaikki asuntokunnat	1 henkilö	2 henkilöä	3 henkilöä	4 henkilöä tai enemmän
2024					
Yhteensä	2 860 961	1 336 181	911 977	280 002	332 801
Omakoti- ja paritalot	1 058 530	264 818	430 343	147 284	216 085
Rivitalot	378 890	177 328	120 017	40 611	40 934
Kerrostalot	1 382 453	867 769	352 351	89 366	72 967
Muut rakennukset	41 088	26 266	9 266	2 741	2 815

Kuva 1. Asuntokunnat koon ja talotyyppin mukaan, 2024 (KOKO MAA). (Tilastokeskus, 2025d, StatFin-tilaus 116a).

3.4 Asuntotyyppin vaikutus kotitalouksien sähkönkulutukseen

Asuntotyyppi ja lämmitysmuoto vaikuttavat kotitalouden vuotuisen sähkönkulutukseen voimakkaasti. Kotitalouksien sähkönkulutusta raportoidaan virallisissa tilastoissa tyyppillisesti sektoritasolla (esim. “koti- ja maataloudet”), eikä tässä työssä tunnistettu yhtenäistä, asuntotyyppin ja lämmitysmuodon mukaan jaoteltua virallista kokonaisaineistoa, jota voisi käyttää suoraan mittakaava-analyysissä (Tilastokeskus, 2025f, StatFin-taulukko 12vm, vuosi 2024).

Taulukko 1 on koottu useista energia-alan toimijoiden ja energianeuvonnan julkaisemista kulutusarvioista; käytetyt lähteet ja poimitut arvot on koottu Liitteeseen 1. Arviot on yhtenäistetty vuotuisiksi kulutuksiksi (kWh/a) ja koottu esittämään vaihteluväli sekä karkea keskiarvo. Taulukon tarkoitus on havainnollistaa suuruusluokkia ja asuntotyyppien välisiä eroja (mittakaava-analyysi), ei esitä tarkkaa kulutusta yksittäiselle kotitaloudelle. Kulutuserot johtuvat erityisesti lämmitysmuodosta, rakennuksen koosta, käyttöasteesta ja asumistottumuksista, minkä vuoksi taulukon arvoja tulee tulkita ohjeellisina.

Koontitaulukossa kerrostaloasuntojen sähkönkulutus jää tyyppillisesti pieneksi, koska rakennus on useimmiten keskuslämmitetty ja asunnon sähkökäyttö painottuu laitteisiin, valaistukseen ja ruoanlaittoon. Rivitaloissa ja omakotitaloissa vaihtelu on selvästi suurempaa, ja erityisesti sähkölämmitys kasvattaa vuotuisesta kulutusta. Vapaa-ajan asunnot on käsitelty erillisenä luokkana Motivan käyttökohdejaon mukaisesti, ja niiden osuus kotitalouksien energian loppukäytöstä on esitetty tilastoyhteenvedossa (Motiva, 2025b).

Taulukon 1 koontilaskelman perusteella kotitalouksien sähkönkulutus on suuruusluokaltaan noin 23,8 TWh vuodessa. Luku on lähellä Tilastokeskuksen vuoden 2024 “koti- ja maataloudet” -sektorin kulutusta, noin 23,6 TWh (Tilastokeskus, 2025f, StatFin-taulukko 12vm, vuosi 2024). On kuitenkin huomiotava, että sektoriluokka sisältää myös maatalouden sähkökäyttöä, eikä vertailu siten ole täysin yksi yhteen.

Taulukko 1. Sähkönkulutus asuntotyypeittäin (koonti eri lähteistä; ks. Liite 1).
Lähteet: Fortum (n.d.-a, n.d.-b); Helen (2025); Lumme Energia (2021, 2023a, 2023b); Sähkövertaaja.fi (n.d.); Turku Energia (2025); Vaasan Sähkö (2025a, 2025b); VertaaEnsin.fi (n.d.).

Asuntotyyppi	Alin kWh/a	Ylin kWh/a	Keskiarvo kWh/a	Asuntoja 2024	Sähkön kulutus yhteensä TWh/a
Kerrostalo	960	4000	1934	1382453	2,7
Omakotitalo	4500	26400	14304	1169456	16,7
Rivitalo	2000	21600	8044	378890	3,0
Muut (arvio)			3000	41088	0,1
Vapaa-ajan asunto	2000	15000	2400	495145	1,2
					23,8

3.5 Kodin yksittäisten sähkölaitteiden sähkönkulutus

Kotitalouksien kuormista osa on käytännössä jatkuvia tai käyttötilanteeseen sidottuja, jolloin niiden ajastaminen on rajallista (esimerkiksi kylmälaitteet, valaistus ja monet viihde- ja tietotekniikkalaitteet). Sen sijaan useita kuormia voidaan ainakin osittain ajoittaa tuntihinnan mukaan, kuten pyykinpesu ja -kuivaus, astianpesu, sähkökiuas/sauna ja ruoanvalmistuksen tietyt vaiheet. Ajastettavuuden näkökulmasta olennaista on, että kuorma voidaan siirtää ilman merkittävää haittaa arjelle ja että siirto kohdistuu teholtaan tai energiankulutukseltaan riittävän merkittävään laitteeseen, jotta vaikutus näkyy myös kulutusprofiilissa.

Taulukko 2 kokoaa Turku Energian kokoamia tyypillisiä sähkönkulutusarvoja kotitalouksien yleisimmille laitteille. Arvot on esitetty lähteen mukaisissa yksiköissä (esim. kWh/vrk, kWh/kerta, kWh/h tai kWh/vuosi), joten niitä tulee tulkita laite- ja käyttötapakohtaisesti. (Turku Energia, n.d.)

Taulukko 2. Kodin sähkölaitteiden tyypillinen sähkönkulutus (mukaillen; yksiköt lähteen mukaisesti). (Turku Energia, n.d.).

Laite	Kulutus	Yksikkö
Sähköliesi	1-2	kWh/vrk
Mikroaaltouuni	0,12–0,2	kWh/10 min
Astianpesukone	0,6–1,6	kWh/kerta
Pyykinpesukone	0,6–1,8	kWh/kerta
Kuivauskaappi	2,2–2,8	kWh/3 kiloa puuvillapyykkiä
Kuivausrumpu	2,1	kWh/3 kiloa puuvillapyykkiä
Kuivausrumpu, lämpöpumpputekniikalla	1	kWh/3 kiloa puuvillapyykkiä
Kiuas, kertalämmitteinen	5,5–10	kWh/kerta
Kiuas, jatkuvasti lämmin	2000–3200	kWh/vuosi
Lämminvesivaraaja	800–1200	kWh/hlö/vuosi
Lattialämmitys, 5 m ² . Käyttöaika 1800 h/vuosi	900	kWh/vuosi
Lattialämmitys, 5 m ² . Käyttöaika 6600 h/vuosi	3300	kWh/vuosi

3.6 Sähköauton kotilataus

Tilastokeskuksen mukaan Suomessa oli vuoden 2024 lopussa yhteensä noin 294 000 ladattavaa henkilöautoa (BEV 121 539; PHEV 172 487) (Tilastokeskus, 2025b, kohta ”Joka kymmenes henkilöauto”). Kansainvälisen vertailun perusteella lataus painottuu kotilataukseen: IEA:n mukaan muun kuin kotilatauksen osuus oli alle 35 % vuonna 2023, mikä tarkoittaa kotilatauksen osuuden olevan vähintään noin 65 % kokonaislatauksesta (International Energy Agency, 2024, kohta ”The share of public”). Näiden havaintojen perusteella kotilataus on perusteltu tarkastelukohde myös suomalaisessa arjessa.

Carunan kansalaiskyselyn mukaan suosituin latausaika on ilta klo 18–21 (41 % vastaajista), ja toiseksi yleisin on yö klo 24–03 sekä 03–06 (39 %) (Caruna, 2024, s. 8). Tulos tukee tulkintaa, että kotilataus kytkeytyy sekä työpäivän rytmiin että sähkön hinnan vuorokausivaihteluun.

Tilastokeskuksen mukaan Suomessa oli vuoden 2024 lopussa liikennekäytössä 2 794 387 henkilöautoa (Tilastokeskus, 2025b, kohta Keskeisiä poimintoja), ja henkilöautoilla ajettiin vuonna 2024 yhteensä 38,6 miljardia kilometriä (Tilastokeskus, 2025c, kohta Keskeisiä poimintoja). Näin ollen yhden liikennekäytössä olevan henkilöauton keskimääräinen ajosuorite oli noin 13 813

km/vuosi. Tilastoissa ei ole saatavilla PHEV- ja BEV-autojen ajosuoritteita eriteltynä.

Motivan mukaan sähköhenkilöauton kulutus on tyypillisesti 15–25 kWh/100 km (Motiva, 2025c, kohta Energiankulutus ja toimintasäde). Tässä työssä arvioidaan ladattavan autokannan vuotuista sähkönkulutusta käyttämällä keskimääräistä ajosuoritetta 13 813 km/vuosi ja kulutushaarukkaa 15–25 kWh/100 km. Tällöin yhden auton vuotuinen sähkönkulutus on noin 2 072–3 453 kWh/a (keskiluku 20 kWh/100 km → 2 763 kWh/a). Kun BEV- ja PHEV-ajoneuvoja on yhteensä noin 294 000, koko kannan vuotuinen sähkönkulutus on suuruusluokkaa noin 0,61–1,02 TWh/a (keskiluku noin 0,81 TWh/a). Mikäli kotilatauksen osuus on IEA:n arvion perusteella vähintään noin 65 %, kotilatauksen osuus on tällöin noin 0,40–0,66 TWh/a (keskiluku noin 0,53 TWh/a). Arvio on suuntaa antava, koska PHEV- ja BEV-ajosuoritteet sekä kulutus poikkeavat toisistaan, eikä niitä ole saatavilla eriteltynä tässä tarkastelussa.

4 SÄHKÖN HINTANALYYSI 2020–2025

Tässä luvussa analysoidaan Suomen hinta-alueen (FI) day-ahead-tuntihintojen vaihtelua ja sen merkitystä kotitalouksien kulutusjoukosta. Tarkastelun tavoitteena on kuvata (1) hintatason ja vaihtelun kehitystä vuositasolla ja kuukausitasolla, (2) nolla- ja negatiivisten hintojen yleistymistä sekä (3) vuorokauden sisäisiä hintaeroja, jotka luovat kannusteen kuormien ajoittamiselle.

Aineisto kerättiin 30.9.2025 ENTSO-E Transparency Platformin rajapinnan kautta ajalta 1.1.2020–30.9.2025, ja se sisältää 50 400 tuntihavaintoa. Aikaleimat muunnettiin Suomen paikallisaikaan (EET/EEST). Hinnat muunnettiin esitettäväksi sentteinä per kilowattitunti (snt/kWh) ja ne on esitetty arvonlisäverollisina ajankohdan voimassa olleen verokannan mukaisesti. Varsinainen analyysi toteutettiin Pythonilla, ja kuviot/taulukot tuotettiin analyysituloksista Excelissä. (Lähde: kirjoittajan analyysi ENTSO-E-aineistosta.)

Huomioitavaa on, että vuosi 2025 sisältää tässä aineistossa havainnot vain ajalta 1–9/2025, joten vuoden 2025 tunnusluvut eivät ole täysin vertailukelpoisia täysiin kalenterivuosiin.

4.1 Hinnan vuosimuutokset

Vuosikeskiarvot ja ääriarvot vaihtelevat merkittävästi tarkastelujaksolla (Taulukko 3). Erityisen korkeita hintatasoja esiintyi vuosina 2021–2022, mikä näkyy myös hintavaihtelun kasvuna. Nolla- ja negatiivisten hintojen määrä kasvoi selvästi vuoden 2022 jälkeen, mikä tukee tulkintaa, että ajoittain markkinoilla esiintyy ylitarjontatilanteita erityisesti runsaan tuuli- ja aurinkotuotannon aikana (Taulukko 3). Vuoden 2023 poikkeuksellisen alhainen minimihinta liittyi Fingridin raportoimaan markkinapoikkeamaan. (Fingrid, 2023b).

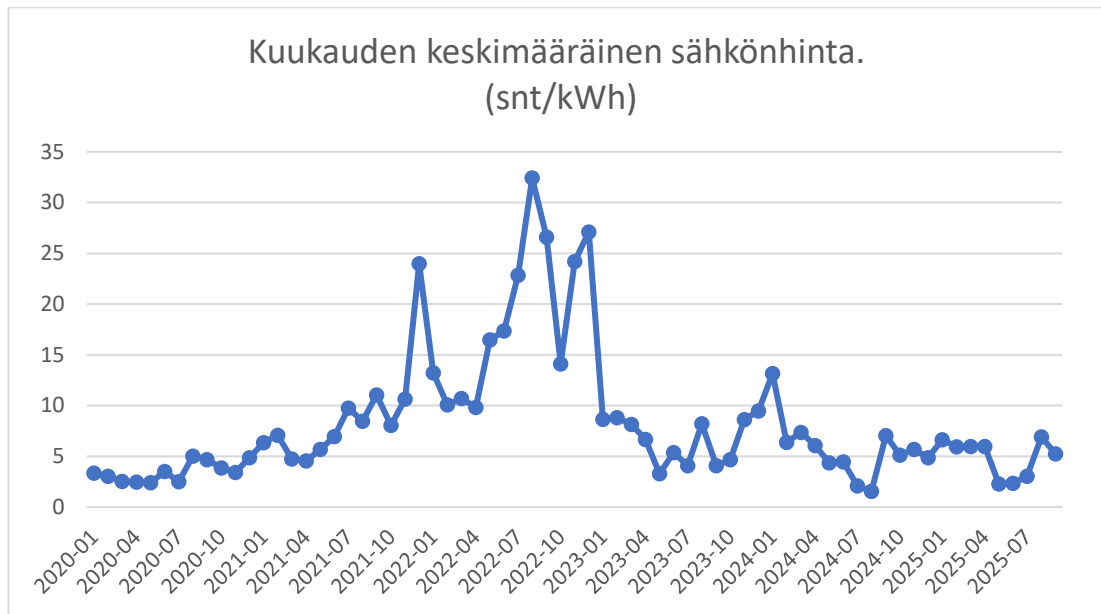
Taulukko 3. Day-ahead-tuntihinnan tunnusluvut vuosittain 2020–2025, aineisto 1.1.2020–30.9.2025. Huom.: Hinta ≤ 0 sisältää nolla- ja negatiiviset tunnit. Lähde: kirjoittajan analyysi ENTSO-E-aineistosta.

Vuosi	Keskiarvo (snt/kWh)	Minimi (snt/kWh)	Maksimi (snt/kWh)	Hinta ≤ 0 tuntia/a
2020	3,48	-0,21	31,55	16
2021	8,97	-0,17	124,01	7
2022	18,81	-0,26	106,78	37
2023	6,67	-62,00	96,37	603
2024	5,67	-2,48	235,10	994
2025	4,92	-2,68	58,67	614

4.2 Sähköhinnan kuukausimuutokset

Kuukausittaiset keskihinnat vaihtelevat tarkastelujaksolla selvästi (Kuvio 1). Vuosina 2020–2021 hinnat olivat pääosin matalalla tasolla, mutta vuoden 2021 loppua kohti näkyy selvä nousu ja ensimmäiset suuret kuukausipoikkeamat. Energiakriisin aikana vuonna 2022 kuukausikeskihinnat nousivat poikkeuksellisen korkeiksi ja vaihtelu kasvoi huomattavasti: aineistossa näkyy useita jyrkkiä nousuja ja laskuja sekä selvästi jakson korkeimmat kuukausikeskiarvot.

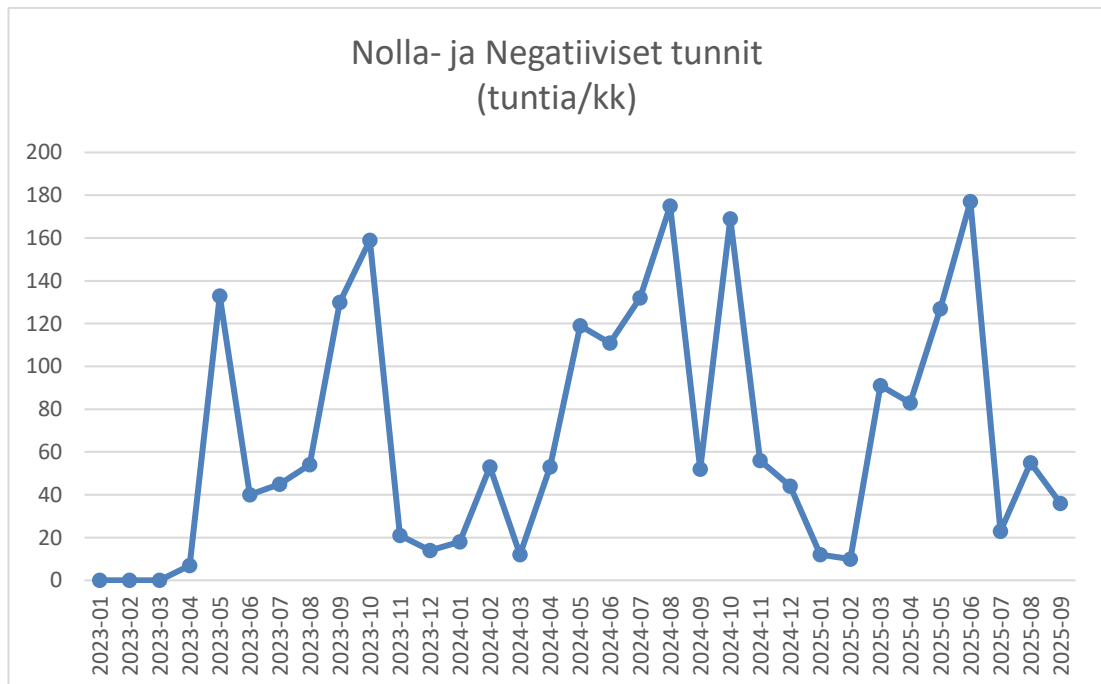
Vuodesta 2023 alkaen kuukausikeskihinnat laskivat ja asettuivat selvästi alemmalle tasolle kuin kriisivuonna, vaikka yksittäisiä kuukausipiikkejä esiintyy edelleen (esimerkiksi talvikaudella ja ajoittain myös muina kuukausina). Vuosina 2024–2025 hintataso pysyy pääosin maltillisena, ja vaihtelu on selvästi pienempää kuin vuonna 2022, mutta kuvio osoittaa, että kuukausikeskiarvoihin voi edelleen syntyä lyhyitä, selviä nousuja.



Kuvio 1. Kuukausittainen keskihinta (snt/kWh) 1/2020–9/2025. Lähde: kirjoittajan analyysi ENTSO-E-aineistosta.

4.3 Nolla- ja negatiiviset tunnit

Nolla- ja negatiiviset tuntihinnat yleistyivät erityisesti vuosina 2023–2025, ja ne painottuvat aineistossa useammin muuhun kuin keskitälven aikaan (Kuvio 2).



Kuvio 2. Nolla- ja negatiivisten tuntihintojen määrä kuukausittain 1/2023–9/2025. Lähde: kirjoittajan analyysi ENTSO-E-aineistosta.

Negatiivisten tuntien jakauma keskittyy lähelle nollaa: valtaosa hinnoista on täsmälleen nolla tai lievästi negatiivinen, kun taas selvästi negatiiviset hinnat ovat harvinaisia (Taulukko 4). Tämä on relevanttia kotitalouksien ohjauksessa, koska jo pienetkin hintaerot voivat ohjata esimerkiksi sähköauton latausta tai varaajien lämmitystä.

Taulukko 4. Nolla- ja negatiivisten hintojen jakauma vuosittain 2020–2025, aineisto 1.1.2020–30.9.2025. Lähde: kirjoittajan analyysi ENTSO-E-aineistosta.

Vuosi	Hinta (snt/kWh)				
	0.00	-0.01...-0.50	-0.51...-1.00	-1.01...-2.00	< -2.00
2020	8	8	0	0	0
2021	2	5	0	0	0
2022	15	22	0	0	0
2023	179	337	54	17	16
2024	376	536	45	34	3
2025	331	242	24	12	5

4.4 Tuntihintojen vuorokauden sisäinen vaihtelu

Vuorokauden sisäinen hintavaihtelu muodostaa kulutusjoustolle keskeisen kannustimen. Taulukko 5 esittää vuosittain päiväkohtaisten hintaerojen keskiarvon kahdella tavalla: (1) vuorokauden kalleimman ja halvimmän tunnin erotuksena sekä (2) kuuden kalleimman ja kuuden halvimmän tunnin keskihintojen erotuksena. Nämä tunnusluvut kuvaavat sitä, millainen hintasignaalin amplitudi kotitalouksia tyypillisesti ohjaa, ja ne antavat ylärajan sille, kuinka suuri säästöpotentiaali voi olla, jos siirrettävä kuorma ajoitetaan systemaattisesti edullisimmille tunneille.

Aineiston perusteella vuorokauden sisäinen vaihtelu kasvoi selvästi energia-kriisin aikana: vuonna 2022 keskimääräinen kalleimman ja halvimmän tunnin erotus oli 24,42 snt/kWh, kun se oli vuosina 2020–2021 selvästi pienempi (4,84–9,85 snt/kWh). Vastaavasti kuuden kalleimman ja kuuden halvimmän tunnin välinen erotus oli suurimmillaan vuonna 2022 (19,14 snt/kWh), mikä korostaa usean tunnin kuormansiirron merkitystä käytännön ohjauksessa (esimerkiksi sähköauton lataus tai varaajien lämmitys). Vuosina 2023–2025 erotukset pienenevät kriisivuoden tasosta, mutta pysyivät edelleen sellaisina, että

ajoituksella voidaan saavuttaa kustannushyötyjä, erityisesti jos ohjaus kohdistuu teholtaan merkittäviin kuormiin. (Taulukko 5.)

Taulukko 5. Vuorokauden sisäisen hintavaihtelun tunnusluvut vuosittain 2020–2025, aineisto 1.1.2020–30.9.2025. Lähde: kirjoittajan analyysi ENTSO-E-aineistosta.

Vuosi	Keskiarvo (snt/kWh)	Kallein - halvin tunti (snt/kWh)	6 Kalleinta - 6 halvinta tuntia (snt/kWh)
2020	3,48	4,84	3,76
2021	8,97	9,85	7,73
2022	18,81	24,42	19,14
2023	6,66	9,11	6,64
2024	5,67	10,05	7,11
2025	4,92	11,18	7,79

Vuorokauden halvimpien tuntien vertailu vuorokauden keskiarvoon havainnollistaa käytännön ohjauksen säästöpotentiaalia, esimerkiksi sähköauton latauksen tai varaajien lämmityksen ajoittamista edullisille tunneille. Taulukossa 6 esitetään kahdella tavalla, kuinka paljon vuorokauden keskihinta ylittää (1) vuorokauden halvimmän tunnin hinnan ja (2) kuuden halvimmän tunnin keskihinnan.

Aineiston perusteella keskihinnan ja kuuden halvimmän tunnin keskihinnan välinen erotus on viime vuosina ollut selkeä: vuosina 2023–2025 erotus on ollut noin 3,23–3,38 snt/kWh (Taulukko 6). Tämä tukee tulkintaa, että jo usean tunnin mittainen kuormansiirto yölle tai muille edullisille jaksoille voi tuottaa kustannushyötyä, kun ohjaus kohdistuu teholtaan merkittäviin kuormiin.

Taulukko 6. Vuorokauden keskihinnan ja halvimpien tuntien vertailu vuosittain 2020–2025, aineisto 1.1.2020–30.9.2025. Lähde: kirjoittajan analyysi ENTSO-E-aineistosta.

Vuosi	Keskiarvo (snt/kWh)	Vrk keskiarvo - halvin tunti (snt/kWh)	Vrk keskiarvo - 6 halvinta tuntia (snt/kWh)
2020	3,48	2,12	1,91
2021	8,97	4,46	3,99
2022	18,81	11,79	10,10
2023	6,66	3,95	3,23
2024	5,67	3,71	3,23
2025	4,92	3,90	3,38

Vuorokauden kalleimpien tuntien hintojen vertailu muihin saman vuorokauden tunteihin havainnollistaa säästöpotentiaalia tilanteessa, jossa kuormaa voidaan siirtää pois kalleimmilta tunneilta muille tunneille. Tämä on erityisen relevanttia esimerkiksi lämmityksen ohjauksessa, jossa kuormaa voidaan usein pienentää lyhyiksi jaksoiksi ilman välitöntä vaikutusta asumismukavuuteen.

Taulukko 7 esittää kuuden kalleimman tunnin keskihinnan ja saman vuorokauden muiden tuntien keskihinnan välisen erotuksen vuosittain. Aineiston perusteella erotus on vuosina 2023–2025 ollut keskimäärin 4,54–5,88 snt/kWh (Taulukko 7). Tämä tukee tulkintaa, että pelkkä kuorman välttäminen vuorokauden kalleimpina tunteina voi tuottaa kustannushyötyä, vaikka energia ei siirtyisi yksinomaan vuorokauden halvimpiin tunteihin.

Taulukko 7. Kuuden kalleimman tunnin ja vuorokauden muiden tuntien keskihinnan erotus vuosittain 2020–2025, aineisto 1.1.2020–30.9.2025. Lähde: kirjoittajan analyysi ENTSO-E-aineistosta.

Vuosi	Keskiarvo (snt/kWh)	6 kalleinta tuntia - Vrk muiden tuntien keskiarvo (snt/kWh)
2020	3,48	2,47
2021	8,97	4,99
2022	18,81	12,05
2023	6,66	4,54
2024	5,67	5,17
2025	4,92	5,88

4.5 Vuorokauden halvin tunti

Kellonaikakohtaisten tuntikeskiarvojen perusteella vuorokauden edullisin kellonaika sijoittuu tarkastelujaksolla useimmiten aamuyöhön, tyypillisesti klo 03–05 (Taulukko 8). Taulukon sarake “Halvin kellonaika keskimäärin” kuvaa sitä kellonaikatuntia, jonka keskihinta on kyseisenä vuonna matalin, kun hintoja tarkastellaan kellonaikakohtaisina tuntikeskiarvoina. Sarake “Kyseisen kellonajan keskihinta” esittää tämän valitun kellonaikatunnin keskimääräisen hinnan. Lisäksi sarake “Vuorokauden halvimman tunnin keskihinta” kuvaa vuoden aikana toteutuneiden päivittäisten minimihintojen keskiarvoa, eli kuinka edulliseksi päivän halvin tunti keskimäärin muodostuu vuoden mittaan.

Taulukko 8. Vuorokauden halvin tunti ja sen keskihinta vuosittain 2020–2025, aineisto 1.1.2020–30.9.2025. Lähde: kirjoittajan analyysi ENTSO-E-aineistosta.

Vuosi	Halvin kellonaika keskimäärin	Kyseisen kellonajan keskihinta (snt/kWh)	Vuorokauden halvimman tunnin keskihinta (snt/kWh)
2020	04:00-05:00	1,51	1,35
2021	03:00-04:00	4,88	4,51
2022	03:00-04:00	8,45	7,02
2023	04:00-05:00	3,89	2,71
2024	04:00-05:00	2,75	1,96
2025	04:00-05:00	2,11	1,02

Kuuden peräkkäisen halvimman tunnin jakso sijoittuu vastaavasti useimmiten yöaikaan (Taulukko 9). Tarkastelun loppupuolella (2024–2025) havaitaan kuitenkin merkkejä siitä, että halvin jakso siirtyy ajoittain keskipäivään, mikä on linjassa aurinkotuotannon kasvun kanssa. Tämä on kotitalouksien ohjausratkaisujen kannalta olennainen muutos, koska se voi muuttaa esimerkiksi sähköauton latauksen ja varaajien lämmityksen optimointia.

Taulukko 9. Halvimman kuuden tunnin jakson ajankohta vuosittain 2020–2025, aineisto 1.1.2020–30.9.2025. Lähde: kirjoittajan analyysi ENTSO-E-aineistosta.

Klo	Jaksojen määrä	% kaikista jaksoista
00:00-06:00	983	47 %
01:00-07:00	364	17 %
02:00-08:00	142	7 %
03:00-09:00	53	3 %
04:00-10:00	16	1 %
05:00-11:00	7	0 %
06:00-12:00	1	0 %
07:00-13:00	2	0 %
08:00-14:00	1	0 %
09:00-15:00	3	0 %
10:00-16:00	12	1 %
11:00-17:00	66	3 %
12:00-18:00	90	4 %
13:00-19:00	35	2 %
14:00-20:00	7	0 %
15:00-21:00	1	0 %
16:00-22:00	0	0 %
17:00-23:00	0	0 %
18:00-00:00	60	3 %
19:00-01:00	8	0 %
20:00-02:00	22	1 %
21:00-03:00	47	2 %
22:00-04:00	34	2 %
23:00-05:00	125	6 %

5 TEKNOLOGIAT SÄHKÖNKÄYTÖN JOUSTON MAHDOLLISTAJINA

Sähkönkäytön jousto toteutuu kotitaloudessa vasta, kun kolme asiaa yhdistyvät:

- ohjattava kuorma
- mittaus- ja tilannetieto
- ohjauslogiikka, joka tuottaa kuormalle ohjauspäätöksen.

Käytännössä ohjausketju voidaan kuvata kerroksina: kuorma (esim. lämmitys tai lataus) → mittaus (kulutus, lämpötila, mahdollinen tuotanto) → ohjauslogiikka (esim. hintaraja tai ennusteohjaus) → toimilaite (rele, termostaatti tai laturi) → seuranta (tapahtumaloki, jäljitettävyyden ja vaikutusten arviointi).

Tässä luvussa jouston teknologiat jäsenetään kuormien ja ohjausarkkitehtuurien näkökulmasta, jotta myöhemmässä tapausesimerkissä ja tulosluvussa voidaan erottaa toisistaan

- tekninen potentiaali
- toteutunut ohjaus
- asumismukavuuden ja käytettävyyden reunaehdot.

Lisäksi jäsenitys luo perustan arvioida, miten paikallinen ohjaus, paikallisen ohjausyksikön (kotiautomaatioyhdyskätävän) kautta toteutettu ohjaus ja pilvipalveluihin perustuvat ratkaisut eroavat luotettavuuden ja vikasietoisuuden, läpinäkyvyyden, tietoturvan sekä käyttäjän hallinnan kannalta.

Koska tämän työn tavoitteena on jäsentää teknologiat ja arkkitehtuurit yleisellä tasolla, tässä luvussa esitetään laiteluokkia ja valintaperusteita sekä esimerkkejä tyypillisistä ratkaisuista. Varsinaisen tapauskohteen laitekoonpano, käytetyt integraatiot ja ohjausparametrit esitetään tapausesimerkkiluvussa (luku 6), jotta luvun 5 sisältö säilyy yleistettävänä eikä toista tapausesimerkin yksityiskohtia.

5.1 Joustoon soveltuvat kuormat kotitalouksissa

Kotitalouden kuormat voidaan jouston kannalta luokitella sen mukaan, voidaanko niiden energiankulutusta siirtää ajassa (kWh) ja kuinka paljon niiden hetkellistä tehoa voidaan muuttaa (kW) ilman, että arjen toimivuus tai mukavuus heikkenee. Käytännössä joustopotentiali liittyy tyypillisesti kuormiin, joissa on sisäänrakennettu varasto: lämpövarasto (rakennus, lämminvesivaraaja) tai sähkövarasto (akku, sähköauto). (Motiva, 2025d, kohta ”Tutustu käytön ajoittamisen”). Pienemmät ajastettavat kuormat (pesukoneet, sauna) voivat olla käyttäjälle helppoja, mutta niiden kokonaisvaikutus jää usein lämmitystä ja latausta pienemmäksi. (Motiva, 2025b, kohta Kotitaloudet).

Tilojen lämmitys ja käyttöveden lämmitys ovat kotitaloudessa keskeisiä ja sähköä paljon kuluttavia ohjauskohteita. Motivan mukaan kotiautomaatio voi ohjata lämmitystä ja käyttöveden lämmitystä automaattisesti halvempiin ajankohtiin. Käytännön esimerkkinä Motiva kuvaa ohjausta, jossa lämminvesivaraajan lämpötilaa nostetaan silloin, kun sähkö on halpaa, ja lämmitys kytkeytyy pois päältä hintarajan ylittyessä. Ohjaus suunnitellaan siten, että asumis- ja käyttömukavuudesta ei tingitä: sisälämpötila pysyy käyttäjän asettamalla tasolla ja lämmintä vettä riittää tavanomaiseen käyttöön. (Motiva, 2025d, kohta ”Vaikuttaako kulutuksen”.)

Sähköauton kotilataus on jouston kannalta suoraviivainen kuorma, koska auton voi usein ladata pysäköinnin aikana yön yli, jolloin latausta voidaan ajoittaa edullisille tunneille. (International Energy Agency, 2024, s. 67; Motiva, n.d., kohta ”Latauksen ajoittaminen”). Ohjauksen reunaehdot ovat käytettävissä oleva latausteho (auton laturi ja latauspisteen mahdollinen tehorojoitus) sekä kiinteistön sähköliittymän mitoitus (esim. pääsulakkeen koko). (Motiva, n.d., kohta ”Selvitä ennen”; Motiva, 2025e, kohta Sähköauton lataustekniikat).

Kodinkoneiden ja saunan ajastus on usein teknisesti helppoa (laiteajastimet tai älypistorasiat). Vaikutus kokonaissummaan on kuitenkin tyypillisesti pienempi kuin lämmityksen tai latauksen. (Motiva, 2025b, kohta ”Kotitaloudet”). Näiden kuormien merkitys korostuu erityisesti tilanteissa, joissa halutaan välttää sähkön hintapiikkien vaikutuksia tai ajoittaa kulutusta, jos käytössä on

esimerkiksi aurinkopaneelit ja/tai sähkövarasto (akku). (Motiva, 2025d, kohta “Kulutusjousto”).

5.2 Lämmityspäivä, lämmityskausi ja lämmitystarveluku ohjauksen syöteenä

Pelkkään sähkön hintaan perustuva ajastus ei huomioi ulkolämpötilan vaihtelun aiheuttamaa lämmitystarpeen muutosta, minkä vuoksi ohjauksen syöteenä hyödynnetään usein ulkolämpötilaan perustuvia tarveindikaattoreita. Yksi Suomessa yleisesti käytetty indeksi on lämmitystarveluku S17 (heating degree days, HDD), jossa peruslämpötilana käytetään +17 °C:ta ja vuorokautinen arvo muodostetaan oletetun sisälämpötilan ja ulkolämpötilan vuorokausikeskiarvon erotuksesta. Lisäksi laskennassa jätetään huomioimatta päivät, joiden keskilämpötila ylittää vuoden alkupuoliskolla +10 °C ja loppupuoliskolla +12 °C. (Ilmatieteen laitos, n.d.-a, kohta “Miten lämmitystarveluku”).

$$HDDt = (T_b - T_t) \cdot I(T_t \leq \theta_t), \quad (1)$$

jossa $I(\cdot) = 1$, jos ehto on tosi, ja 0 muuten; $T_b = 17$ °C on peruslämpötila; T_t on vuorokauden keskilämpötila; ja kausiraja θ_t on +10 °C ajalla 1.1.–30.6. ja +12 °C ajalla 1.7.–31.12. Koska $\theta_t < T_b$, kaava tuottaa aina ei-negatiivisen HDDt-arvon niille päiville, jotka kuuluvat lämmityskauteen.

Tilastokeskuksen käsitelmäritelmässä sama periaate esitetään lämmityskauden katkaisurajoina: lämmitys lopetetaan keväällä ulkoilman lämpötilan nousua yli +10 °C ja aloitetaan syksyllä sen laskettua alle +12 °C (17 °C sisälämpötilaoletuksella). (Tilastokeskus, n.d.-b, kohta Määritelmä 1).

Lämmityspäivä ja lämmityskausi johdetaan tyypillisesti lämmitystarveluvusta siten, että lämmityspäiväksi tulkitaan vuorokausi, jolloin lämmitystarveluku on positiivinen ($HDDt > 0$). Lämmityskauden määrittelyssä käytetään usein pysyvyysskriteeriä (esim. usean peräkkäisen lämmityspäivän jakso), jotta yksittäiset lyhyet lämpöjaksot eivät katkaise kautta. Näin voidaan erottaa toisistaan (1) kausi, jolloin lämmitystä tyypillisesti tarvitaan, ja (2) kauden sisäinen päivittäinen vaihtelu.

Ohjauksen näkökulmasta lämmitystarvelukua voidaan hyödyntää erityisesti kolmessa roolissa: (1) ohjausparametrien mitoittamisessa (esim. halpojen tuntien määrä suhteessa lämmitystarpeeseen), (2) tulosten normalisoinnissa ja vertailukelpoisuuden parantamisessa eri vuosien ja jaksojen välillä (sääriippuvuuden huomiointi) sekä (3) lämmityskauden rajauksessa, kun tarkastellaan ohjauksen vaikutuksia sisälämpötilaan ja käyttöaikaan. Tämän työn tapausesimerkissä lämmitystarveluvun soveltaminen ja käytetyt kausirajat esitetään luvussa 6.

5.3 Ohjaus- ja automaatioteknologiat

Kotitalouksien kulutusjoustop ohjauksratkaisut voidaan jäsentää kolmeen pääarkkitehtuuriin:

- ohjaus laitteessa paikallisesti (esim. ajastin tai hintaraja)
- ohjaus paikallisen ohjausyksikön kautta (edge-/gateway-järjestelmä, kuten kotiautomaatioalusta)
- ohjaus pilvipalvelun kautta (energiapalvelu tai valmis ohjauspalvelu)

Jaottelu vastaa laajemmassa HEMS-kentässä havaittua rakennetta, jossa ohjaus voi olla integroituna laitteisiin, toteutettuna erillisellä paikallisella laitteella tai täysin pilvipohjaisena ratkaisuna. (Daly ym., 2025, s. 4, 19–20.)

Arkkitehtuurivalinta vaikuttaa erityisesti vikasietoisuuteen (säilykö toiminta yhteyskatkossa), vasteaikoihin, tietosuojaan sekä siihen, kuinka monimutkaisia ohjauslogiikoita ja ulkoisia signaaleja (esim. markkina- tai verkko-ohjaus) voidaan hyödyntää. Pilvipohjaiset ratkaisut mahdollistavat laajemman data-analytiikan ja ulkoisten ohjelmien (esim. kysyntäjousto/VPP) kytkennän, mutta ne ovat herkempiä internet-yhteyden nopeuden ja toimintakunnon rajoitteille ja niihin liittyy myös tietoturva- ja tietosuola huolia. Hybridi- tai paikalliset ratkaisut voivat puolestaan tarjota nopeamman vasteen ja jatkaa perustoimintoja myös yhteyskatkossa, mikä parantaa luotettavuutta ohjauksen kannalta. (Daly ym., 2025, s. 21–23.)

Arkkitehtuurivalintaa voidaan arvioida käytännön ohjauksen näkökulmasta neljällä peruskriteerillä. Ensinnäkin vikasietoisuus: säilykö vähintään

turvallinen perustila, jos internetyhteys, pilvipalvelu tai integraatio ei ole käytävissä. Toiseksi läpinäkyvyys ja käyttäjän hallinta: ymmärtääkö käyttäjä, miksi ohjaus tekee muutoksia ja voiko hän tarvittaessa ohittaa ohjauksen. Kolmanneksi tietoturva ja tietosuojat: mitä tietoja kerätään, mihin niitä siirretään ja miten järjestelmä suojataan. Neljänneksi ylläpidettävyys ja riippuvuudet: kuinka paljon ratkaisu vaatii käyttäjältä huoltoa, päivityksiä ja integraatioiden ylläpitoa sekä kuinka herkkä se on muutoksille.

Kotitalousautomaation ekosysteemi on lisäksi pirstaleinen: laite- ja palvelutarjonta on laaja, ja yhteentoimivuus edellyttää usein tuote- ja mallikohtaisia integraatioita. Tämä näkyy käytännössä siinä, että suuri osa ratkaisuista nojaa räätälöityihin integraatioihin eri laitevalmistajien kanssa, mikä kasvattaa ylläpitotyötä ja tekee yhteensopivuuden arvioinnista käyttäjälle vaikeaa. (Daly ym., 2025, s. 4–6.)

Siksi tässä työssä ei pyritä kokoamaan kattavaa laite- tai palveluluettelo, vaan hyödynnetään päivittyviä julkisia integraatio- ja laitetietokantoja. Home Assistant ylläpitää julkista integraatioluettelo (Home Assistant, n.d., kohta Integrations), openHAB julkaisee vastaavan add-on -hakemiston (openHAB, n.d., kohta Add-ons) ja Node-RED tarjoaa Flow Library -kirjaston valmiille nodeille ja esimerkkivirroille (Node-RED, n.d., kohta Node-RED Library). Zigbee-laitteiden osalta Zigbee2MQTT:n luettelo kattaa tuhansia laitteita sadoilta valmistajilta (Zigbee2MQTT, n.d.). Lisäksi ESPHome-ekosysteemille on julkinen laite- ja konfiguraatiorepositorio (ESPHome Devices, n.d., kohta “ESPHome Device”), ja Tasmota-laitteille vastaavasti sekä dokumentoitu template-mekanismi että laitetietokanta (Tasmota, n.d., kohta Templates; Blakadder, n.d., kohta “Tasmota Supported”).

5.4 Energiavarastot ja reservimarkkinoihin kytketyt ratkaisut

Energiavarastot voidaan kotitalouksissa jäsentää kolmeen tasoon:

- lämpövarastot (rakennuksen lämpömassa, lämminvesivaraaja)
- sähkövarastot (kotiakku)
- liikkuvat varastot (sähköauton akku).

Lämpövarastot ovat useimmissa kodeissa jo valmiiksi olemassa, joten niiden hyödyntäminen joustossa on usein käytännöllinen lähtökohta: ohjaus siirtää lämmöntuotantoa edullisille tunneille ja rajoittaa kuormaa kalliina tunteina mukavuusrajojen puitteissa. Esimerkiksi lämminvesivaraajan ohjaaminen matalan hinnan tunneille on tyypillinen kulutusjoustop toteutustapa. (Fingrid, n.d.-h, kohta "Miten voin vaikuttaa").

Kotiakku mahdollistaa sähköenergian varastoinnin ja käytön joustavasti kodin sisällä (esimerkiksi varaus edullisina tunteina ja purku kalliina tunteina). Sähköauton akku voi pidemmällä aikavälillä laajentaa tätä edelleen, jos kaksisuuntaisen latauksen laitetuki ja markkinakäytännöt yleistyvät. Käytännössä myös yksisuuntainen sähköauton lataus on joustava kuorma, jota voidaan ohjata sekä hinnan että järjestelmän tarpeiden mukaan.

Energiavarastojen rooli korostuu myös kantaverkon tasapainotuksessa, koska Fingrid hankkii sähköjärjestelmän reaaliaikaista tasapainoa ylläpitäviä reservituotteita reservimarkkinoilta. Reservimarkkinoilla on erillisiä kapasiteetti- ja energiamarkkinoita: kapasiteettimarkkinoilla toimittaja ylläpitää sovitun määrän säätökykyä ja saa siitä korvauksen, ja energiamarkkinoilla korvaus määräytyy aktivoituneen energian perusteella. Reservimarkkinoilla hinnoittelu perustuu tyypillisesti marginaalihinnoitteluun. (Fingrid, 2024a, s. 5.)

Reservituotteet eroavat toisistaan aktivointilogiikan ja nopeusvaatimusten osalta. Taajuusohjatut reservit (FCR) aktivoituvat automaattisesti paikalliseen taajuusmittaukseen perustuen, eikä Fingrid lähetä niihin erillistä ohjaussignaalia; markkinoille pääsy edellyttää tuotekohtaisten teknisten vaatimusten osoittamista säätökokeilla. FCR-N-tuotteessa minimitarjouskoko on 0,1 MW, kun taas FCR-D ylös/alas -tuotteissa minimitarjouskoko on 1 MW. (Fingrid, n.d.-i, kohta Tekniset vaatimukset.)

Signaali-ohjatuissa ja manuaalisissa reserveissa Fingrid (tai pohjoismainen ohjaus) aktivoi resurssin erillisellä tehonmuutossignaalilla tai aktivointipyyntöillä. Automaattisessa taajuuden palautusreservissä (aFRR) minimitarjouskoko on 1 MW ja täysi aktivoituminen tulee saavuttaa 5 minuutissa; reservitoimittaja saa kapasiteetin ylläpidosta kapasiteettikorvauksen ja aktivoinneista syntyvä energia huomioidaan taseselvityksessä. (Fingrid, n.d.-j.) Manuaalisessa

taajuuden palautusreservissä (mFRR) Fingrid hyödyntää sekä kapasiteetti-markkinaa (kapasiteetin ylläpitokorvaus) että energiamarkkinaa (aktivoidun energian korvaus); mFRR-kapasiteettimarkkinan minimitarjouskoko on 1 MW, ja säätökykyisen kohteen tulee kyetä toteuttamaan minimitarjouskoon mukainen tehonmuutos 12,5 minuutissa. (Fingrid, n.d.-b, kohdat mFRR, manuaalinen taajuuden palautusreservi, Tarjoukset).

Kotitalous ei tyypillisesti voi osallistua reservimarkkinoille suoraan, koska reservimarkkinoilla minimitarjouskoot ovat 100 kW tai 1000 kW tuotekohtaisesti. Sen sijaan kotitalouksien laitteistoja (esim. lämminvesivaraajia tai akkuja) voidaan koota aggregoimalla riittävän suureksi kokonaisuudeksi, jonka reservitoimittaja tarjoaa Fingridin reservimarkkinoille. Kotitalouden näkökulmasta tämä edellyttää sopimusta palveluntarjoajan kanssa sekä sen varmistamista, että palveluntarjoajalla on Fingridin kanssa reservisopimus. Lisäksi reservikäyttö voi rajoittaa laitteiston omaa käyttöä ja lisätä esimerkiksi akun lataus-purkukykyjen määrää. (Fingrid, n.d.-g.)

5.5 Ohjauksen reunaehdot: tarveohjaus, luotettavuus ja käyttäjän hallinta

Ohjauksen toimivuus kotitaloudessa ei riipu vain optimointialgoritmistä, vaan myös reunaehdoista:

- tarveohjaus (lämmitystarve vs. pelkkä halvimmat tunnit)
- vikasietoisuus (mitä tapahtuu yhteyskatkossa)
- käyttäjän hallinta (ohitus, asetettavat rajat, läpinäkyvyys).

Tapausesimerkissä havaittava ilmiö on tyypillinen: jos ohjaus ei vastaa käyttäjän kokemusperäistä tarvetta tai mukavuusrajoja, käyttäjät tekevät korjaavia toimenpiteitä (esim. ylikirjoittavat ohjauksen), mikä heikentää automaation ennustettavuutta ja hyväksyttävyyttä. Kotitalouksien DSR-ohjelmien hyväksyttävyyteen vaikuttavat erityisesti automaation toteutustapa ja koettu hallinta, ja ylikirjoitukset (overrides) ovat käytännössä yleinen ilmiö automaattisissa

termostaattiohjauksissa kysyntäjoustopäivien aikana. (Fell ym., 2015, s. 72–73, 79; Sarran ym., 2021, kohta Abstract).

Tarveohjausta voidaan yksinkertaistaa hyödyntämällä ulkolämpötilaan perustuvia indikaattoreita (kuten lämmitystarvelukua ja lämmityskauden raja-arvoja), jolloin ohjaus mukautuu vuodenaikaan ja siirtymäkausiin ilman jatkuvaa käsisäätöä.

Luotettavuuden kannalta keskeistä on vikaturvallinen toimintatapa (fail-safe): lämmityksen ja käyttöveden minimirajat on pystyttävä varmistamaan myös silloin, kun hintadataa tai ohjauspalvelua ei saada. Vikaturvallisuudessa (fail-safe) tavoitteena on, että vikatilanteessa järjestelmä siirtyy ennalta määritettyyn turvalliseen oletustilaan; turvallinen tila ja palautumistapa on määriteltävä etukäteen sovelluksen vaatimusten mukaan. (Novak, 2008, s. 51–52, 58–59.) Pilvipohjaisessa ohjauksessa on lisäksi huomioitava yhteysriippuvuus: jos kotitalouden internetyhteys on poikki, laitteiden ohjaus voi olla menetetty, kunnes yhteys palautuu. (Daly ym., 2025, s. 21–22).

Käyttäjän näkökulmasta ohjauksen tulee olla läpinäkyvä (mitä ohjataan ja miksi) sekä helposti ohitettavissa, jotta järjestelmä ei näyttäydy läpinäkymättömänä ohjauksena tai aiheuta ”mustan laatikon vaikutelmaa”. Läpinäkyvyyden on havaittu parantavan käyttäjien hyväksyntää ja vähentävän reaktanssia älytermostaattien automaattisissa asetusten muutoksissa. (Heatherly ym., 2023, kohta Abstract.) Näitä periaatteita vasten voidaan myöhemmissä luvuissa arvioida sekä tapausesimerkin toteutusta että kyselyaineistossa esiin nousseita luotettavuus- ja vaivannäkötekijöitä.

6 TAPAUSESIMERKKI

Tässä luvussa esitetään tapausesimerkki, jossa omakotitalon lämmitystä ja sähköauton latausta ohjataan sähkön tuntihinnan perusteella. Tavoitteena on (1) kuvata toteutettu mittaus- ja ohjausratkaisu, (2) arvioida ohjauksen vaikutusta asuinmukavuuteen sisälämpötilan vaihtelun avulla sekä (3) laskea toteutunut kustannushyöty verrattuna vertailutilanteeseen, jossa lämmitys kävisi tasan vuorokauden aikana ilman hintaohjausta.

Tapausesimerkin aineisto koostuu kiinteistön mittalaitteiden tuottamasta kulu- ja lämpötiladatasta, joka on yhtenäistetty tuntitasolle. Yhdistettyä mittausdataa on saatavilla ajalta 28.10.2022–20.2.2025. Ohjausratkaisun kehitystä testattiin aluksi useilla vaihtoehtoilla, ja varsinaiseen tutkimukseen valittiin pilvipalvelupohjainen ohjausratkaisu (OnOffer.io), jolla ohjattiin Shelly-releitä. Luvussa esitettävät kustannuslaskelmat sisältävät arvonlisäveron (ALV), mutta eivät sisällä sähkönsiirtomaksuja eivätkä muita siirron yhteydessä laskutettavia eriä.

6.1 Perustiedot

Tapausesimerkin kohde on vuonna 1952 valmistunut puurakenteinen omakotitalo Turussa. Kiinteistöön on tehty lämmitykseen ja eristykseen liittyviä remontteja vuosina 2019–2021. Pääasiallinen lämmitysmuoto on maalämpö. Kahdessa alimmassa kerroksessa on vesikiertoinen lattialämmitys ja yläkerrassa vesikiertoinen patterilämmitys. Yläkerran tukilämmityksenä on ilmalämpöpumppu.

Kiinteistön vuotuinen sähkönkulutus on noin 15 000 kWh, sisältäen sähköauton latauksen (arviolta 2 500–3 000 kWh vuodessa). Tapausesimerkin

tavoitteiden kannalta keskeiset ohjattavat kuormat ovat maalämpöpumppu (tilalämmitys ja käyttövesi) sekä sähköauton kotilataus.

6.2 Mittalaitteet ja datan keruu

Kiinteistön sisä- ja ulkolämpötilaa sekä ilman laatua on mitattu Netatmon langattomalla sääasemalla, jossa on yksi ulkolämpötila-anturi ja 1–4 sisätiloihin sijoitettua anturia. Mittausdataa on kerätty 15 minuutin tarkkuudella. Netatmon ulkolämpötila-anturin tieto on saatavilla 18.9.2023 saakka, jonka jälkeen anturi vikaantui.

Sähkökulutuksen tuntikohtainen mittaus perustuu Shelly 3EM -mittaukseen. Kaikki mittausdata on muunnettu 60 minuutin jaksoihin laskemalla tunnin keskiarvo. Yhdistettyä mittausdataa on saatavilla ajalta 28.10.2022–20.2.2025, ja tätä aineistoa käytetään luvun 6 analyyseissä (sisälämpötilan vaihtelu, lämmityksen käyttöaika sekä kustannuslaskenta).

6.3 Ohjauslaitteet

Maalämpöpumpun ohjaus toteutettiin hyödyntämällä Thermian EM3-laajenusmoduulin (älykäs sähköverkko / EVU) digitaalisia tuloja. Tuloyhdistelmillä voidaan valita neljä toimintatilaa, joista tässä työssä hyödynnettiin EVU-tilaa (kompressori ja sisäinen sähkövastus estetään) sekä Boost-tilaa (käyttöveden korkeammat käynnistys- ja pysäytyslämpötilat sekä korkeampi huoneasetus). (Thermia, 2020, s. 28). Ohjaus toteutettiin Shelly Pro 2 -releellä, jolla kytkettiin EM3:n tuloja asetusten mukaisesti.

Ohjausratkaisua kokeiltiin aluksi manuaalisella ohjauksella ja yksinkertaisilla ajastuksilla, minkä jälkeen käyttöön otettiin pilvipalvelupohjainen OnOffer.io. Palvelulla voidaan ohjata Shelly-releitä valitsemalla esimerkiksi, kuinka monta vuorokauden halvinta tuntia kuorma on päällä, tai asettamalla hintaraja, jonka alapuolella rele on päällä. (OnOffer, n.d.). Menetelmän rajoite on, että palvelu ei arvioi automaattisesti rakennuksen lämmitystarvetta, joten tarvittavaa tuntimäärää joudutaan säätämään olosuhteiden mukaan.

Sähköauton latausta ohjattiin aluksi ohjelmoitavalla kellokytkimellä ja myöhemmin Shelly Pro 1 -releellä. Latauksen ohjaus toteutettiin periaatteeltaan vastaavasti kuin lämmityksen ohjaus: lataus ajoitettiin pääosin vuorokauden edullisimmille tunneille.

6.4 Lämmityspäivä ja lämmityskausi

Luvussa 5 esitetyn lämmitystarvelukuun (HDD, S17) perustuvan periaatteen mukaisesti tässä työssä lämmityspäiväksi määritellään päivä, jolloin lämmitystarveluku on positiivinen ($HDDt > 0$). Lämmityskausi muodostetaan pysyvyyss-kriteerillä, jotta lyhyet lämpöjaksot eivät katkaise kautta: kausi alkaa, kun lämmityspäiviä on kolme peräkkäin, ja päättyy, kun kolme peräkkäistä päivää on ilman lämmitystä ($HDDt = 0$).

Lämmityskausien muodostamisessa käytettiin lähimmän sääaseman (Turku Rajakari) lämpötilatietoja. Rajakarin havaintojen perusteella johdetut lämmityskaudet vuosille 2020–2025 on esitetty taulukossa 10. Näitä kausirajoja hyödynnetään luvun 6 sisälämpötilan vaihtelun tarkasteluissa (taulukot 11–12) sekä lämmityksen käyttöajan vertailussa.

Taulukko 10. Lämmityskaudet 2020–2025, Turku Rajakari

Lämmityskausi	Alku	Loppu
2020	2020-01-01	2020-05-24
2020–2021	2020-10-11	2021-05-10
2021	2021-05-21	2021-05-28
2021	2021-09-03	2021-09-05
2021–2022	2021-09-14	2022-05-18
2022	2022-08-31	2022-09-08
2022	2022-09-16	2022-10-04
2022–2023	2022-10-11	2023-05-11
2023	2023-05-17	2023-05-19
2023	2023-06-01	2023-06-03
2023–2024	2023-10-04	2024-05-13
2024–2025	2024-09-28	2025-05-17
2025	2025-05-21	2025-05-25
2025	2025-09-28	2025-10-06
2025	2025-10-10	

6.5 Referenssimittaukset ennen koetta

Ennen varsinaista hintaohjaukseen perustuvaa koejaksoa muodostettiin referenssi sisälämpötilan normaalille vuorokausivaihtelulle tilanteessa, jossa maalämpöpumppu käy jatkuvasti laitteen oman säätölogiikan mukaisesti. Referenssijakso kattaa ajan 1.1.2020–31.8.2022. Sisälämpötilan vuorokausivaihtelu määritettiin laskemalla kullekin vuorokaudelle korkeimman ja matalimman mitatun sisälämpötilan erotus ja ottamalla erotuksista keskiarvo tarkastelujaksolle.

Referenssin lisäksi eroteltiin konseptin testausjakso (1.9.2022–31.12.2022) sekä varsinainen lämmityksen hintaohjausjakso (1.1.2023–20.2.2025). Jaksoittaiset tulokset eri mittauspisteille on koottu taulukkoon 11 ja vuosittainen tarkastelu taulukkoon 12.

Taulukko 11. Päivän korkeimman ja matalimman lämpötilan keskimääräinen ero, jaksot

Päivän korkeimman ja matalimman lämpötilan keskimääräinen ero, °C						
Jakso	Alku	Loppu	Keittiö	Makuuhuone	Olohuone	Alakerta
Referenssi	01/01/2020	31/08/2022	1,02			
Konseptin testaus	01/09/2022	31/12/2022	1,04	1,32	1,27	
Lämmityksen ohjauksen hinnan mukaan	01/01/2023	20/02/2025	1,34	1,99	1,50	1,17

Taulukko 12. Päivän korkeimman ja matalimman lämpötilan keskimääräinen ero, vuodet

Päivän korkeimman ja matalimman lämpötilan keskimääräinen ero, °C				
Vuosi	Keittiö	Makuuhuone	Olohuone	Alakerta
2020	1,05			
2021	1,02			
2022	1,00	1,32	1,26	
2023	1,52	2,02	1,57	1,29
2024	1,20	2,06	1,44	0,78
2025	1,16	1,59	1,39	1,41

6.6 Lämmityksen päälläoloaika

Lämmityksen käyttöajan tarkastelussa tavoitteena on verrata toteutunutta maalämpöpumpun käyntiaikaa ulkolämpötilaan perustuvaan teoreettiseen tarpeeseen. Toteutunut käyttöaika muodostettiin mittausdatasta (luku 6.2) tunti-tasolla ja koottiin kuukausitasolle.

Teoreettinen käyttöaika muodostettiin yksinkertaistetulla mallilla, jossa ulkolämpötilan perusteella arvioidaan lämmitystarpeen suhteellinen taso ja muunnetaan se käyttöajaksi vuorokaudessa. Menetelmän tarkoitus on havainnollistaa, miten lämmitystarpeen kausivaihtelu ja vuorokausiprofiili poikkeavat hintaohjauksen toteutuneesta ohjauksesta. Vuoden 2024 kuukausitasoinen vertailu on esitetty taulukossa 13.

Taulukko 13. Vuoden 2024 kuukausitason lämmitysaika vertailu

Kuukausi	Ulkolämpötila, °C	Lämmitys + lämmin vesi, h/vrk	
		Teoreettinen aika	Todellinen aika
2024-01	-5,3	12,4	12,0
2024-02	-2,2	10,7	9,1
2024-03	0,4	9,3	6,8
2024-04	2,9	7,9	5,9
2024-05	12,5	3,3	3,9
2024-06	16,6	2,0	2,0
2024-07	18,7	2,0	1,5
2024-08	18,3	2,0	2,0
2024-09	15,3	2,2	2,8
2024-10	10,2	3,8	4,2
2024-11	5,1	6,7	6,1
2024-12	2,1	8,3	7,7

6.7 Taloudellinen hyöty

Taloudellinen hyöty määritettiin vertaamalla hintaohjatun käytön kustannusta vertailutilanteeseen, jossa maalämpöpumpun energiankulutus jaetaan tasaisesti vuorokauden tunneille (ei hintaohjausta). Laskennassa käytettiin Shelly 3EM:n mittaamaa tuntikohtaista sähkönkulutusta ja pörssisähkön tuntihintoja.

Vertailu tehtiin kaikille mittausjakson vuorokausille riippumatta lämmityskaudesta, koska maalämpöpumppu tuottaa myös lämpimän käyttöveden.

Kaikki luvun 6 kustannuslaskelmat sisältävät arvonlisäveron (ALV). Laskelmissa ei huomioida sähkönsiirtomaksuja eikä muita siirron yhteydessä laskutettavia eriä. Lisäksi laskelmissa ei huomioida mahdollista lämpöpumpun hyötysuhteen (COP) muutosta hintaohjauksen seurauksena, koska luotettavaa, kokeessa mitattuun aineistoon perustuvaa arviota ei ollut saatavilla.

Taulukon 14 perusteella säästö on ollut vuositasolla noin 100–135 €, mikä vastaa noin 28–30 % säästöä verrattuna vertailutilanteeseen.

Taulukko 14. Rahallinen säästö vuodessa

Vuosi	Kustannus ilman optimointia (€)	Säästö (€)	Säästö (%)	Huomatus
2022	398,19	77,27	19 %	28.10.2022 alkaen
2023	457,69	135,79	30 %	
2024	352,25	100,18	28 %	
2025	95,63	37,14	39 %	20.2.2025 asti

6.8 Kokemukset ja yhteenveto

Sisälämpötilan vuorokausivaihtelu kasvoi hintaohjauksen aikana verrattuna referenssijaksoon (taulukot 11–12). Tämä on johdonmukaista sen kanssa, että lämmitystä keskitetään vuorokauden edullisille tunneille ja annetaan sisälämpötilan laskea pidempien katkojen aikana. Muutoksen suuruus vaihteli mittauspisteittäin, ja vaikutus kohdistui voimakkaammin osaan tiloista.

Sähköauton latauksen ajoitus koettiin käytännössä vaivattomaksi, koska latausta voitiin pitää pääosin vakioasetuksella (esimerkiksi kuusi halvinta tuntia). Lämmityksen ohjauksessa suurin käytännön haaste oli sopivan tuntimäärän asettaminen muuttuvien olosuhteiden mukaan, koska valittu pilvipalvelu ei arvioi automaattisesti rakennuksen lämmitystarvetta.

Teknisesti kokonaisuus toimi pääosin luotettavasti. Yksittäisiä yhteyskatkoja esiintyi Wi-Fi-yhteyteen perustuvassa ohjauksessa, mutta ongelmia saatiin

vähennettyä siirtymällä kiinteään verkkoyhteyteen lämmitystä ohjaavan releen osalta. OnOffer.io-palvelu toimi koejakson aikana luotettavasti.

Yhteenvetona tapausesimerkki osoittaa, että pörssisähkön hintaan perustuvalla ajoituksella voidaan saavuttaa mitattava kustannushyöty, mutta samalla ohjaus voi lisätä sisälämpötilan vaihtelua ja vaatia käyttäjältä manuaalista säätöä, jos ohjauslogiikka ei huomioi lämmitystarpeen vaihtelua automaattisesti.

Tapausesimerkki ei ole tilastollisesti yleistettävä, vaan sen tarkoituksena on havainnollistaa, millä tavoin pörssihintaperusteinen ohjaus voi toimia yksittäisessä kotitaloudessa ja millaisia reunaehtoja (mukavuus, luotettavuus, ohitusmahdollisuudet) käytännön toteutuksessa ilmenee. Tuloksia tulee tulkita suuntaa antavina ja kontekstisidonnaisina.

7 KYSELYTUTKIMUS SÄHKÖNKÄYTÖN OPTIMOINNISTA

Kyselytutkimuksella kartoitettiin suomalaisten kotitalouksien mahdollisuuksia ja valmiuksia osallistua sähkönkäytön joustoon sekä kiinnostusta oman sähkönkulutuksen optimointiin. Kysely suunnattiin pääasiassa kotitalouksille, jotka ovat jo jollain tavalla kiinnostuneita sähkönkäytön optimoinnista ja sähkönsäästämisestä, esimerkiksi lämmityksen, lämpimän käyttöveden, sähköauton latauksen tai muiden suurten sähkölaitteiden ajastamisen kautta. Samalla tavoitteena oli saada mukaan myös kotitalouksia, jotka eivät tällä hetkellä aktiivisesti optimoi sähkönkäyttöään, jotta tuloksiin sisältyisi myös ei-optimointia tekevien näkökulma.

Kyselyllä pyrittiin selvittämään erityisesti (1) kotitalouksien teknisiä valmiuksia sekä käytössä olevia sovelluksia ja ohjaustratkaisuja, (2) ajankäyttöä ja koettua kuormittavuutta sekä (3) koettua taloudellista hyötyä ja osallistumisen esteitä. Kysymykset ja vastausvaihtoehdot on esitetty kokonaisuudessaan liitteessä 2.

Kysely oli täysin anonyymi eikä kerännyt henkilötietoja. Vastaajia ohjeistettiin olemaan kirjoittamatta vastauksiin nimiä, osoitteita tai muita yksilöiviä tietoja. Vastaukset tallennettiin Satakunnan ammattikorkeakoulun E-lomake-palveluun, ja niitä käytetään ainoastaan tämän opinnäytetyön toteuttamiseen. Raakadataa säilytetään enintään 31.3.2026 saakka, jonka jälkeen se poistetaan. Tietojen käsittelyssä ja säilytyksessä noudatetaan Satakunnan ammattikorkeakoulun tietoturva- ja tietosuojaohjeita. (Satakunnan ammattikorkeakoulu, n.d.).

Kyselyä markkinoitiin Facebookin eri ryhmissä, ja vastauksia saatiin yhteensä 279. Kysely oli avoinna ajalla 11.–30.11.2025. On huomioitava, että otos ei ole satunnaisotos väestöstä, vaan vastaajajoukko painottuu lähtökohtaisesti niihin kotitalouksiin, joita sähköns hinta ja optimointi jo kiinnostavat. Tämän vuoksi tuloksia tulee tulkita ensisijaisesti kuvaamaan optimointimyönteistä kotitalousjoukkoa ja sen käytäntöjä.

Kyselylomakkeessa vain ensimmäinen kysymys (tekeekö kotitalous aktiivista sähkönkäytön optimointia) oli pakollinen. Kaikkiaan vastauksia saatiin 279 ja tämän perusteella vastaajat jakautuivat kahteen ryhmään: optimointia tekevät

($N_{opt} = 234$) ja ei-optimointia tekevät ($N_{ei} = 45$). Muiden kysymysten vastaaminen oli vapaaehtoista, joten yksittäiseen kysymykseen vastanneiden määrä (n) voi olla pienempi kuin kyseisen perusjoukon koko (N). Tässä luvussa jokaisen kysymyksen yhteydessä ilmoitetaan käytetty perusjoukko $N = xxx$ (esim. kaikki vastaajat $N = 279$ tai ryhmäkohtaisesti $N_{opt} = 234 / N_{ei} = 45$) sekä kyseiseen kysymykseen vastanneiden määrä $n = xxx$. Tulokset esitetään muodossa k (%), missä k on kyseisen vaihtoehdon valinneiden määrä ja prosentti osuus on laskettu vastanneiden (n) määrästä. Monivalintakysymyksissä vastaaja saattoi valita useita vaihtoehtoja, jolloin prosenttiosuuksien summa voi ylittää 100 %; myös tällöin k kuvaa vaihtoehdon valinneiden määrää.

7.1 Vastaajien taustaprofiili ja kotitalouksien energijärjestelmät

Vastaajista valtaosa tekee aktiivista sähkönkäytön optimointia tai ajastusta. Yhteensä 234 vastaajaa (84 %) ilmoitti optimoivansa tai ajastavansa sähkönkäyttöä, kun taas 45 vastaajaa (16 %) ei tee aktiivista optimointia. Aineisto edustaa siten ensisijaisesti sellaista joukkoa, joka on jo valmiiksi kiinnostunut pörssisähköstä ja kulutuksen ohjaamisesta, mutta mukana on myös vertailuryhmä, joka ei vielä optimoi. $N = 279$, $n = 279$.

Kotitalouden sähköasioiden päätöksenteko painottuu selvästi kyselyyn vastaajiin: 248 vastaajaa (89 %) ilmoitti olevansa päävastuussa kotitaloutensa sähköasioista ja 31 vastaajaa (11 %) osallistuvansa päätöksiin. Tämä tukee tulkintaa siitä, että aineisto painottuu henkilöihin, joilla on mahdollisuus vaikuttaa kotitalouden sopimusvalintoihin ja ohjauskäytäntöihin. $N = 279$, $n = 279$.

Sähkösopimustyyppi on vastaajajoukossa selvästi pörssisähköpainotteinen. Pörssisähkösopimus on 234 vastaajalla (84 %), kiinteä hinta 30 vastaajalla (11 %) ja jousto-/hybridityyppinen sopimus 12 vastaajalla (4 %). Pieni osa vastaajista ei osannut sanoa tai jätti kysymykseen vastaamatta. $N = 279$, $n = 278$.

Asumismuodon osalta aineisto painottuu selvästi pientaloihin. Omakotitalossa asuu 224 vastaajaa (80 %), rivitalossa 29 vastaajaa (10 %), kerrostalossa 14 vastaajaa (5 %) ja paritalossa 8 vastaajaa (3 %). Lisäksi muutama vastaaja ilmoitti asuvansa maatilalla tai muussa pientalotyyppisessä kohteessa. $N =$

279, n = 279. Asunnon pinta-ala sijoittuu useimmiten 100–149 m² -luokkaan (130 vastaajaa, 47 %) tai 150–199 m² -luokkaan (64 vastaajaa, 23 %). Tämä painotus on linjassa sen kanssa, että optimoinnin suurimmat tekniset ja taloudelliset vaikutukset kohdistuvat tyypillisesti pientaloihin, joissa on oma lämmitys ja suuremmat ohjattavat kuormat. N = 279, n = 279.

Pääasiallinen lämmitysmuoto vaihtelee, mutta vastaajajoukossa korostuvat sähköpohjaiset ratkaisut. Yleisin luokka on ilmalämpöpumppu yhdistettynä suoraan sähköön 96 (34 %), jonka jälkeen seuraavat suora sähkölämmitys 53 (19 %), maalämpö 37 (13 %), kaukolämpö 25 (9 %), ilma-vesilämpöpumppu 21 (8 %), öljylämmitys 7 (3 %), varaaja/sähkökattila 6 (2 %). Lisäksi osa vastaajista valitsi ”muu, mikä” -vaihtoehdon 34 (12 %), jossa tyypillisesti kuvataan yhdistelmä- tai kohdekohtaisia ratkaisuja. N = 279, n = 279.

Sähkön vuotuinen kulutus kysyttiin avoimena arviona. Suurin osa vastaajista antoi numeerisen arvion, ja tyypilliseksi kulutukseksi muodostuu mediaanina noin 13 000 kWh/vuosi. Kulutusvaihtelu on suuri, mikä on odotettavaa, koska vastaajajoukossa on sekä vähäisen sähkönkulutuksen kotitalouksia että sähkölämmitteisiä ja muuten energiaintensiivisiä kohteita. N = 279, n = 274.

7.2 Toissijainen lämmitys ja kuormien ajoitus optimointia tekevissä kotitalouksissa

Optimointia tekeviltä vastaajilta kysyttiin, hyödynnetäänkö toissijaista lämmitystä hinnan perusteella ja mihin kohteisiin kulutusta ajoitetaan tai ohjataan. Toissijaisen lämmityksen hyödyntäminen painottuu selvästi puulämmitykseen: 156 optimointia tekevää vastaajaa (70 %) ilmoitti hyödyntävänsä puulämmitystä (takka/leivinuuni/keskuslämmitys) hinnan perusteella. Toissijaista lämmitystä ei hyödynnä 56 vastaajaa (25 %). Muita vaihtoehtoja (esimerkiksi muu tai öljy/kaasu) valitsi pieni osa vastaajista. N = 234, n = 222.

Ajoitettavien ja ohjattavien kuormien jakauma osoittaa, että optimointi kohdistuu useimmiten sellaisiin kuormiin, joissa ajoitus on arjessa mahdollinen ja vaikutus kustannuksiin voi olla merkittävä. Yleisimmät kohteet ovat pyykki- ja astianpesu (163 vastaajaa, 70 %), lämpimän käyttöveden tuotanto (161 vastaajaa, 69 %) sekä pääasiallinen lämmitys (133 vastaajaa, 57 %). Saunaa ajoittaa

120 vastaajaa (52 %). Sähköauton latausta ajoittaa tai ohjaa 86 vastaajaa (37 %) ja ilmalämpöpumppua 82 vastaajaa (35 %). Akuston latausta tai purkua ohjaa 15 vastaajaa (7 %). Monivalintakysymys, N = 234, n = 232. Tulokset tukevat tulkintaa siitä, että kotitalouksien jouston kannalta keskeisimmät kuormat ovat lämmitys, käyttövesi ja sähköauton lataus, mutta myös arjen kuormia (kodinkoneet ja sauna) ajoitetaan laajasti.

7.3 Ohjauslaitteet, automaatioalustat ja ratkaisujen luotettavuus

Optimointia tekevien kotitalouksien teknisessä toteutuksessa korostuvat kuluttajille suunnatut älyreleet ja ohjainlaitteet. Yleisin ohjelmoitava rele on Shelly, jota käyttää 52 vastaajaa (46 %). Sonoff-laitteita hyödyntää 4 vastaajaa (4 %) ja muita kuluttajatuotteita, kuten Aqara/Tuya/Tapo-tyyppisiä ratkaisuja, 9 vastaajaa (8 %). Teknisesti orientoituneempi joukko hyödyntää Raspberry Pi -ratkaisuja (6 vastaajaa, 5 %) sekä Arduino/ESP32/DIY-toteutuksia (9 vastaajaa, 8 %). Muita laitteita, kuten Themo, Siemens Logo!, Zigbee, OptiWatti tai Powerant käyttää 50 (44 %) vastaajaa. Monivalintakysymys, N = 234, n = 114.

Ohjausalustoista yleisin on laitevalmistajan oma sovellus, jota käyttää 69 vastaajaa (39 %). Home Assistant -ympäristöä hyödyntää 22 vastaajaa (12 %), Node-REDiä 7 vastaajaa (4 %) ja energiayhtiön tarjoamia ohjauspalveluja 16 vastaajaa (9 %). Kolmannen osapuolen palveluja käyttää 14 vastaajaa (8 %). Yhteensä 43 vastaajaa (24 %) ilmoittaa, ettei käytä ohjelmoitavaa relettä tai ohjainlaitetta lainkaan, vaan tukeutuu esimerkiksi laitteiden omiin ajastuksiin tai manuaaliseen ohjaukseen. Vastaajista 30 (17 %) hyödyntää muuta palvelua tai itse tehtyä ohjausta. Monivalintakysymys, N = 234, n = 177.

Ohjauslogiikoista yleisin on "halvimmat X tuntia vuorokaudessa" -malli, jota käyttää 104 vastaajaa (63 %). Yö- ja päiväaikaan perustuva ohjaus on käytössä 51 vastaajalla (31 %), ja hintarajaan perustuva ohjaus 50 vastaajalla (30 %). Oma algoritmi on 31 vastaajalla (19 %) ja ennusteisiin tai säähän perustuva ohjaus 25 vastaajalla (15 %). Energiayhtiön palvelu on 14 vastaajalla (9 %) ja muu 3. osapuolen palvelu on käytössä 5 vastaajalla (3 %). Laitevalmistajan ohjausta käyttää 41 vastaajaa (25 %). Muu logiikka, kuten manuaalinen

säätö on mainittu 17 vastauksessa (10 %). Monivalintakysymys, N = 234, n = 165.

Automaation aste vaihtelee, mutta täysin manuaalisia ratkaisuja on vähemmistöllä. Lähinnä manuaaliseksi oman kulutuksen ohjauksen kokee 76 vastaajaa (41 %), osittain automaattiseksi 62 vastaajaa (34 %) ja pitkälti automaattiseksi 46 vastaajaa (25 %). N = 234, n = 184. Ratkaisujen koettu luotettavuus on pääosin hyvä: erittäin luotettavana järjestelmänsä pitää 76 vastaajaa (41 %), melko luotettavana 72 vastaajaa (39 %) ja kohtalaisen luotettavana 31 vastaajaa (17 %). Melko tai erittäin epäluotettavaksi ratkaisunsa arvioi vain 7 vastaajaa (4 %). N = 234, n = 186.

7.4 Optimoinnin ajankäyttö, kuormittavuus, asumismukavuus ja säästöt

Optimoinnin ajankäyttö ja koettu kuormittavuus olivat kyselyssä keskeisiä teemoja, koska laajamittaisen käyttöönoton kannalta ratkaisevaa on, kuinka paljon optimointi kuormittaa arkea ja vaikuttaa asumismukavuuteen.

Pörssihintojen seurantaan ja omien asetusten säätämiseen käytetty aika on useimmissa kotitalouksissa rajallinen. Niistä optimointia tekevästä vastaajista, jotka ilmoittivat ajankäytön (N = 234, n = 227), 135 (59 %) käyttää päivässä 1–5 minuuttia, 39 (17 %) 6–10 minuuttia ja 23 (10 %) 11–30 minuuttia. Vain 7 (3 %) käyttää 31–60 minuuttia ja 15 (7 %) yli 60 minuuttia päivässä. Lisäksi 8 vastaajaa (4 %) ilmoitti ajankäytöksi 0 minuuttia, mikä viittaa käytännössä täysin automaattiseen ohjaukseen tai hyvin vakiintuneeseen asetukseen. Kokonaiskuvana optimointi näyttäytyy useimmille mikrotason rutiinina, ei jatkuvana seuranta- tai päivystystehtävänä.

Koettu kuormittavuus heijastaa ajankäyttöä. Niistä optimointia tekevästä vastaajista, jotka arvioivat kuormittavuutta (N = 234, n = 228), 132 (58 %) piti optimointia ei lainkaan kuormittavana ja 67 (29 %) vähän kuormittavana. Jonkin verran kuormittavana sen koki 18 (8 %) ja melko kuormittavana 10 (4 %). Erittäin kuormittavana optimointia piti vain yksi vastaaja. Tulokset viittaavat siihen, että optimointi ei useimmilla lisää merkittävästi arjen kuormitusta, vaikka osalla kokemus kuormittavuudesta on selvästi suurempi.

Asumismukavuuden osalta yleisin koettu vaikutus on parempi kustannusten hallinta, jonka mainitsi 155 vastaajaa (67 %). Mitään vaikutusta ei havainnut 79 vastaajaa (34 %). Tyypillisimpiä haittavaikutuksia ovat sisälämpötilan suurempi vaihtelu (66 vastaajaa, 29 %), saunomisen tai ruoanlaiton ajoituksen rajoittuminen (59 vastaajaa, 26 %) sekä laitteiden käyttöikkunoiden koettu arkea rajoittava vaikutus (16 vastaajaa, 7 %). Lämpimän veden ajoittaisen riittämättömyyden mainitsi 16 vastaajaa (7 %) ja yöaikaisten laitteiden melun 11 vastaajaa (5 %). Monivalintakysymys, N = 234, n = 230. Havainnot tukevat tulkin-
taa, että optimoinnin hyväksyttävyyden kannalta kriittisiä ovat lämpötilaan ja arjen rytmiin liittyvät vaikutukset: jos ohjaus heikentää mukavuutta, osallistumisen halukkuus voi vähentyä, vaikka kustannushyöty olisi olemassa.

Taloudellinen hyöty kysyttiin vastaajien arviona kuukausisäästöistä. Niistä optimointia tekevästä vastaajista, jotka arvioivat säästön määrän, yleisin säästöluokka on 11–30 €/kk (66 vastaajaa, 32 %) ja 31–60 €/kk (57 vastaajaa, 27 %). Pienemmän 1–10 €/kk säästön ilmoitti 31 vastaajaa (15 %). 61–100 €/kk säästöä raportoi 25 vastaajaa (12 %), 101–200 €/kk 16 vastaajaa (8 %) ja yli 200 €/kk 13 vastaajaa (6 %). N = 234, n = 208. Koska kyse on itsearvioituista säästöistä, tuloksia tulee tulkita suuntaa antavina; kuitenkin jakauma viittaa siihen, että merkittävä osa vastaajista kokee saavansa optimoinnista konkreettista taloudellista hyötyä, erityisesti paljon sähköä kuluttavissa kohteissa.

7.5 Kiinteä hinta, motivaatio ja optimoinnin esteet ei-optimointia tekevien näkökulmasta

Kyselyssä tarkasteltiin myös sitä, miten vastaajat suhtautuisivat kiinteähintaiseen sopimukseen sekä mitkä tekijät motivoivat optimointiin. Lisäksi ei-optimointia tekeville (N = 45) kartoitettiin keskeiset esteet optimoinnin aloittamiselle.

Kiinteää hintaa koskevassa skenaariossa optimointia tekeviä vastaajia pyydettiin arvioimaan, valitsisivatko he kiinteän hinnan, jos sen taso vastaisi viimeisen 12 kuukauden pörssisähkön omalla käytöllä painotettua keskiarvoa. Niistä vastaajista, jotka vastasivat tähän kysymykseen, 75 (33 %) ilmoitti jäävänsä pörssisähköön ja jatkavansa optimointia. Kiinteän hinnan valitsisi, mutta

jatkaisi ainakin osaa optimoinneista, 69 vastaajaa (31 %). Kiinteään hintaan siirtyisi ja optimointia vähentäisi tai lopettaisi 66 vastaajaa (29 %). Lisäksi 14 vastaajaa (6 %) ei osannut sanoa kantaansa. $N = 234$, $n = 224$. Tulokset viittaavat siihen, että optimointi ei ole monille pelkkä pörssisähkön pakottama toimintatapa, vaan osa vastaajista jatkaisi optimointia myös kiinteällä hinnalla (esimerkiksi mukavuuden tai harrastuksen vuoksi), kun taas osalle optimointi on vahvasti sidoksissa hintavaihtelun hyödyntämiseen.

Optimointiin motivoivista syistä keskeisin on rahansäästö, jonka mainitsi 219 vastaajaa (95 %). Mielenkiinto, harrastus ja tekninen kokeilunhalu motivoivat 123 vastaajaa (54 %). Halu tukea sähköjärjestelmän tasapainoa ja huippukulutuksen leikkaamista mainittiin 90 vastauksessa (39 %), ja ympäristöön tai oman sähkönkulutuksen vähentämiseen liittyvät syyt 94 vastauksessa (41 %). Hinnanvaihtelun aiheuttaman epävarmuuden vähentämisen mainitsi 73 vastaajaa (32 %) ja automaation tuoman mukavuuden 56 vastaajaa (24 %). Mahdollisuus hyödyntää omaa aurinkosähköä paremmin motivoi 38 vastaajaa (17 %), ja varautuminen/omavaraisuus (esimerkiksi häiriötilanteisiin valmistautuminen) 32 vastaajaa (14 %). Monivalintakysymys, $N = 234$, $n = 230$. Kokonaiskuvana optimointi näyttäytyy monelle taloudellisen, teknisen ja arvopohjaisen motivaation yhdistelmänä.

Optimoinnin esteitä tarkasteltiin erikseen niiden 45 vastaajan joukossa, jotka eivät tee aktiivista optimointia. Tässä ryhmässä yleisimmät esteet ovat taloudellisen hyödyn epäselvyys ja asumismukavuuteen liittyvät huolet. "En näe taloudellista hyötyä" -vaihtoehdon valitsi 15 vastaajaa (33 %) ja asumismukavuuteen liittyvät huolet 14 vastaajaa (31 %). Optimointia piti liian monimutkaisena 13 vastaajaa (29 %), ja laitteiden tai palveluiden kustannuksia piti esteenä 11 vastaajaa (24 %). Lisäksi 11 vastaajaa (24 %) ilmoitti, ettei halua optimoida. "Ajan puute" mainittiin 7 vastauksessa (16 %) ja "ei mahdollista (talo-yhtiö/tekniikka/vuokra-asuminen)" 5 vastauksessa (11 %). Ratkaisujen tai yhteyksien luotettavuus mainittiin harvoin (2 vastaajaa, 4 %), eikä tietosuoja/kyberturva noussut tässä aineistossa keskeiseksi esteeksi. Monivalintakysymys, $N = 45$, $n = 45$.

7.6 Yhteenveto

Kyselytutkimus osoitti, että vastaajajoukko koostuu pääosin pörssisähkön käyttäjistä ja pientaloissa asuvista kotitalouksista, joilla on keskimäärin merkittäviä ohjattavia kuormia (erityisesti lämmitys ja lämpimän käyttöveden tuotanto). Vastaajista valtaosa tekee aktiivista optimointia, mutta mukana on myös ei-optimointia tekevä vertailuryhmä, jonka näkökulmasta keskeiset esteet liittyvät hyödyn epäselvyyteen, mukavuushuoliin, koettuun monimutkaisuuteen ja ratkaisujen kustannuksiin.

Optimointia tekevien kotitalouksien käytännöt painottuvat kohteisiin, joissa ajoitus on arjessa realistista ja taloudellinen vaikutus voi olla merkittävä: kodinkoneiden ajastuksen lisäksi erityisesti käyttövesi ja lämmitys ovat yleisiä ohjauksen kohteita, ja sähköauton lataus on merkittävä kohde siinä osajoukossa, jolla latausta on käytettävissä. Ohjauslogiikoista yleisin on "halvimmat X tuntia" -periaate, mutta käytössä on myös hintarajaan, yö-päivä-jakoon sekä ennusteisiin perustuvia ratkaisuja.

Ajankäytön ja kuormittavuuden osalta tulokset ovat myönteisiä: useimmat vastaajat käyttävät optimointiin vain muutamia minuutteja päivässä, ja optimointi koetaan useimmiten ei lainkaan tai vain vähän kuormittavaksi. Asumismukavuudessa keskeisin koettu hyöty on parempi kustannusten hallinta, mutta haittavaikutuksina korostuvat sisälämpötilan vaihtelu ja arjen ajoitusrajoitteet. Tämä viittaa siihen, että laajempi käyttöönotto edellyttää ratkaisuja, jotka ovat helppokäyttöisiä, luotettavia, käyttäjän hallittavissa (mukavuusrajat ja ohitusmahdollisuus) ja jotka vähentävät manuaalisen säätämisen tarvetta.

Tuloksia hyödynnetään seuraavassa luvussa (tulokset ja johtopäätökset), jossa kyselyhavaintoja yhdistetään kirjallisuuskatsaukseen, hintadatan analyysiin ja tapausesimerkin mitattuihin tuloksiin kotitalouksien joustopotentiaalin ja käyttöönoton ehtojen arvioimiseksi.

8 TULOKSET JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Tässä luvussa kootaan yhteen työn keskeiset tulokset ja muodostetaan johtopäätökset kirjallisuuskatsauksen, tuntihintadatan analyysin, tapausesimerkin sekä kyselytutkimuksen perusteella. Luvun laskelmissa on käytetty vuoden 2024 tilastoja ja pörssisähkön tuntihintoihin perustuvia tunnuslukuja, ellei toisin mainita. Laskelmat kuvaavat sähköenergian hintaa (sis. arvonlisäveron) ja perustuvat FI-alueen day-ahead-tuntihintoihin. Laskelmissa ei huomioida sähkönmyyjän marginaalia, perusmaksuja eikä sähkönsiirtoon liittyviä kustannuksia, koska ne vaihtelevat yhtiöittäin ja sopimustyypeittäin, eivätkä muuta kuormien ajoituksen suhteellista kannattavuutta samalla tavalla kuin energiahinnan tuntivaihtelu.

Alaluvuissa 8.1–8.6 arvioidaan joustopotentialia ja säästöpotentialia eri kotitaloustyypeissä ja kuormissa. Alaluvuissa 8.7–8.9 tarkastellaan käyttöönoton ehtoja, kuormittavuutta sekä jouston mittakaavaa sähköjärjestelmän näkökulmasta. Luvun lopussa vastataan tutkimuskysymyksiin koottuna.

8.1 Kerrostaloasunnon potentiaali

Taulukossa 1 on esitetty arvio keskimääräisestä asunnon sähkön vuosikulutuksesta. Kerrostaloasunnon kohdalla keskiarvoksi on laskettu 1934 kWh/a. Ilman optimointia ja tasaisella kulutuksella vuosikustannus olisi 109 €.

Taulukossa 17 on arvioitu asunnon eri kulutuskohteiden vuosikulutusta. Laskelmassa on käytetty taulukon 2 arvoja, joiden perusteella laskenta on tehty. Laskelmasta havaitaan, että kylpyhuoneen sähköisen lattialämmityksen osuus on 47 % kaikesta sähkönkulutuksesta. Tämä kuorma on usein helposti ohjelmoitavissa vuorokauden edullisimmille tunneille, jos käytössä on pörssisähköjohdettava lattialämmityssäädin. Laskelmassa ei-ohjelmoitavien kuormien osuudeksi on saatu yhteensä 20 % kaikesta sähkönkulutuksesta. Ruoanlaiton osuus on 20 %, ja loput 13 % muodostuu pyykin- ja astianpesusta. Rahallinen säästö voisi olla lattialämmityksen ohjauksella 29 €, ruoanlaitossa 13 € ja pesukoneiden käytössä 8 € vuodessa, jos käyttö voidaan optimoida kuuden halvimman tunnin ajalle. Arvio on suuntaa antava ja riippuu erityisesti siitä, onko

asunnossa sähköisiä lämmityskuormia (esim. lattialämmitys) sekä siitä, kuinka suuri osa kulutuksesta on ajastettavissa arjen reunaehdoilla.

Taulukko 17. Kerrostaloasunnon sähkönkulutusjakauman arvio

Käyttökohde / laite	Oletus käytöstä	kWh/a	Osuus
Lattialämmitys (5 m ²)	1800 h/a	900	47 %
Sähköliesi	~1 kWh/vrk	365	19 %
Astianpesukone	~2 krt/vko, 1,0 kWh/kerta	104	5 %
Pyykinpesukone	~2 krt/vko, 1,0 kWh/kerta	104	5 %
Kuivaus, lämpöpumpputekniikalla	~1 krt/vko, 1,0 kWh/3 kg	52	3 %
Mikroaaltouuni	~5 min/vrk (≈0,15 kWh/10 min)	27	1 %
Valaistus + jääkaappi + elektroniikka + muu	Loppu, jotta summa = vuosikulutus	382	20 %
Yhteensä		1934	100 %

8.2 Omakotitalon potentiaali

Taulukossa 1 on esitetty arvio keskimääräisestä asunnon sähkön vuosikulutuksesta. Omakotitalon kohdalla vuosikulutuksen keskiarvoksi on laskettu 14 304 kWh/a. Ilman optimointia ja tasaisella kulutuksella vuosikustannus olisi 811 €.

Omakotitalojen sähkönkulutus painottuu lämmitykseen ja lämpimän käyttöveden tuotantoon. Motivan tilastoyhteenvedon mukaan tilojen lämmitys ja käyttöveden lämmitys kattavat yhteensä 77 % kotitalouksien kokonaiskulutuksesta. Lisäksi saunan osuus on 5 %, valaistuksen ja sähkölaitteiden 13 % sekä vapaa-ajan asuntojen 5 %. (Motiva, 2025b, kohta Kotitaloudet.) Vapaa-ajan asuntojen osuus on poistettu taulukon 18 prosentuaalisten osuuksien laskennasta, jotta tarkastelu kohdistuu varsinaiseen omakotitalouden kulusrakenteeseen.

Mikäli lämmitys ja lämpimän käyttöveden tuotanto voitaisiin siirtää optimaalisesti vuorokauden kuudelle halvimmalle tunnille tasaisen käytön sijaan, vuosittainen säästöpotentiaali olisi laskennallisesti 374 €. Tämä on kuitenkin teoreettinen yläraja. Tapausesimerkin tulokset osoittavat, että ympärivuotisen lämmityksen siirtäminen kokonaisuudessaan kuuden tunnin jaksoihin ei ole

käytännössä mahdollista, koska kylmimpinä vuodenaikoina lämmöntarve kasvaa ja tarvittava käyttöaika ylittää kuuden tunnin tason. Lisäksi “halvimmat tunnit” voivat vuorokausien välillä sijoittua ääripäihin, jolloin lämmityskäyntien väliin voi muodostua liian pitkiä taukoja.

Tapausesimerkissä lämmityksen ja lämpimän käyttöveden ohjauksella saavutettiin keskimäärin noin 28–30 % kustannussäästö vertailutilanteeseen nähden, mikä vastasi tarkastellussa kohteessa noin 100–135 € vuotuista säästöä (2023–2024). Mikäli samaa suhteellista säästöä sovelletaan keskimääräisen omakotitalon lämmityksen ja lämpimän käyttöveden osuuteen (Taulukko 18) ja vuoden 2024 keskihintaan, säästö on suuruusluokaltaan noin 200 €/a. Tulokinta on suuntaa antava, koska todellinen säästö riippuu rakennuksen lämpökuormasta, ohjauslogiikasta ja siitä, kuinka suuri osa kulutuksesta on aidosti siirrettävissä mukavuusrajojen puitteissa.

Taulukko 18. Omakotitalon sähkönkulutusjakauman arvio

Käyttökohde	Alkuperäinen osuus	Oikaistu osuus	kWh/a
Tilojen lämmitys	61 %	64 %	9185
Käyttöveden lämmitys	16 %	17 %	2409
Saunat	5 %	5 %	753
Valaistus ja sähkölaitteet	13 %	14 %	1957
Yhteensä	95 %	100 %	14304

8.3 Lämmitysmuodon merkitys säästöpotentiaaliin

Lämpöpumpun optimoinnissa tulee huomioida paitsi sähkön tuntihinta myös lämpöpumpun hyötysuhde (COP) ja sen käyttäytyminen eri käyttötilanteissa. Menoveden lämpötilaa nostetaan usein hintaperusteisessa optimoinnissa, jotta lämpöä voidaan tuottaa enemmän edullisilla tunneilla ja varastoida sitä rakenteisiin tai vesivaraajaan. Menoveden lämpötilan nostaminen kuitenkin kasvattaa lämpötilanostoa (temperature lift), eli lämmönluovutus- ja lämmönlähdepuolen lämpötilojen erotusta, mikä heikentää lämpöpumpun hyötysuhdetta (Wang ym., 2013, s. 1460). Wang ym. (2013, s. 1459–1460) toteavat, että suurempi lämpötilanosto johtaa pienempään COP-arvoon. Tämän vuoksi optimointi voi pienentää ostetun energian hintaa (€/kWh) siirtämällä tuotantoa

edullisille tunneille, mutta samalla kasvattaa kulutusta (kWh), mikäli menoveden lämpötilaa joudutaan nostamaan merkittävästi. Taloudellisesti kannattava optimointi edellyttää kompromissia: menoveden lämpötilaa nostetaan vain sen verran kuin on tarpeen, jotta tavoitelämpötilat saavutetaan ilman merkittävää COP:n heikkenemistä.

Edellä mainitun perusteella lämpöpumpun ohjauksessa voi olla tarkoituksenmukaista käyttää pelkkien halvimpien tuntien hyödyntämisen sijaan logiikkaa, joka ensisijaisesti välttää vuorokauden kalleimmat tunnit. Taulukossa 7 on esitetty kuuden kalleimman tunnin ja vuorokauden muiden tuntien välinen hintaero. Tämän tyyppinen ohjaus mahdollistaa lämpöpumpun käynnin jopa 18 tuntia vuorokaudessa lämmöntarpeen mukaan. Vastaavasti kuuden halvimmän tunnin logiikassa lämmöntuotanto ajoittuu lyhyempään aikaan, jolloin lämpöpumpun vaadittu keskimääräinen teho kasvaa ja samalla riski hyötysuhteen heikkenemisestä sekä lämmityksen ajautumisesta osittain myös kalliimmille tunneille kasvaa erityisesti kylmimpinä jaksoina.

Lisäksi ohjauksen taloudellista hyötyä arvioitaessa on huomioitava, että kokonaishintaan vaikuttaa myös sähkön siirto. Siirtomaksu (sekä siihen liittyvät verot ja maksut) muodostaa osan sähkön kokonaishinnasta ja voi pienentää tuntihintaan perustuvan optimoinnin suhteellista säästöä, koska siirtohinta ei yleensä vaihtele pörssisähkön tapaan tunneittain. Tässä luvussa esitetyt säästöarviot koskevat sähköenergian osuutta, joten kokonaissähkölaskussa euroääräinen säästö on tyypillisesti pienempi kuin energiahinnan perusteella laskettu säästö.

Vastuksiin perustuvassa lämmityksessä ohjauksen lähtökohta on yksinkertaisempi kuin lämpöpumpulla, koska hyötysuhde ei käytännössä muutu käyttötilanteen mukaan. Kulutettu sähköenergia muuttuu lämmöksi lähes suoraan, eikä menoveden lämpötilan nostaminen aiheuta COP:n heikkenemiseen liittyvää lisäkulutuksen riskiä. Tämän vuoksi kuuden halvimmän tunnin logiikka voi olla vastuslämmityksessä usein perusteltu ja kustannustehokas ohjausstrategia. Ohjauksen suunnittelussa on kuitenkin varmistettava järjestelmän lämmönvarausteho sekä erityisesti lämpimän käyttöveden riittävyys, jos lämmitys on pitkään pakotettuna pois päältä kalliiden tuntien aikana. Käytännössä tämä tarkoittaa esimerkiksi varaajan koon ja tavoitelämpötilojen mitoittamista sekä

varmistuslogiikkaa, joka sallii lämmityksen käynnin myös kalliilla tunneilla, mikäli sisälämpötila tai käyttöveden lämpötila uhkaa laskea alle asetetun rajan.

8.4 Lämmityksen todellisen ja teoreettisen tarpeen erot sekä niiden merkitys ohjauksessa

Tulokset osoittavat, että talvikaudella teoreettinen ja toteutunut lämmitysaika ovat keskenään varsin lähellä toisiaan, mikä on odotettavaa, koska ulkolämpötila määrittää tällöin vahvasti rakennuksen lämpöhäviöt ja lämmitystarpeen. Sen sijaan siirtymäkausina ja erityisesti kesäkuukausina erot kasvavat selvästi. Tämä havainto on yhdenmukainen lämmitystarvelukuun (HDD) perustuvan tarkastelun kanssa, jossa lämmityskausi katkeaa, kun vuorokauden keskilämpötila ylittää määritellyn raja-arvon. Tässä työssä teoreettiseen malliin on lisätty lämmityskauden ulkopuolelle kiinteä kahden tunnin päivittäinen lämmitysaika, joka kuvaa lämpimän käyttöveden tuotantoa sekä pesutilojen mukavuuslämmitystä. Tästä huolimatta toteutunut lämmitysaika poikkeaa useina kuukausina teoreettisesta, mikä viittaa siihen, että käytännön ohjaus ei täysin seuraa todellista lämpötilariippuvaista tarvetta.

Erot korostuvat erityisesti siirtymäkausina, jolloin ulkolämpötila vaihtelee päivittäin ja lämmitystarve on ajoittaista. Kiinteisiin aikaohjelmiin perustuva ohjaus ei kykene reagoimaan näihin vaihteluihin, vaan lämmitystä tapahtuu myös tilanteissa, joissa rakennuksen lämpötase ei sitä edellyttäisi. Tämä näkyy toteutuneen lämmitysajan ylikorostumisena suhteessa teoreettiseen tarpeeseen etenkin keväällä ja syksyllä. Tulokset tukevat käsitystä siitä, että lämmitysjärjestelmän ohjauksen tulisi perustua ensisijaisesti ulkolämpötilaan ja siitä johdettuun lämmitystarpeeseen, eikä ennalta määriteltyihin kellonaikoihin. Dynaaminen, lämpötilaan sidottu ohjaus mahdollistaa lämmityksen ajoittamisen todelliseen tarpeeseen, vähentää turhaa energiankulutusta ja parantaa järjestelmän kokonaisyötysuhdetta ilman, että asumismukavuus heikkenee.

Lisäksi tulokset tukevat laajempaa johtopäätöstä, jonka mukaan lämmitysmuodolla ja sen ohjattavuudella on keskeinen merkitys kotitalouksien säästöpotentiaalissa. Erityisesti vesikiertoiset järjestelmät ja lämpöpumput, joissa lämpöä voidaan varastoida rakenteisiin tai varaajiin, soveltuvat hyvin

dynaamiseen ohjaukseen. Kun lämmitystä ohjataan ulkolämpötilaan ja todelliseen lämmitystarpeeseen perustuen, voidaan samalla tukea sähkönkulutuksen ajoittamista edullisemmille tunneille ja vähentää kuormitusta kalliiden hintajaksojen aikana. Tämä osoittaa, että lämmityksen ohjaus on yksi keskeisimmistä yksittäisistä keinoista, joilla kotitaloudet voivat osallistua sähköjärjestelmän tasapainottamiseen.

8.5 Toissijaiset lämmitysmuodot

Tulosten perusteella toissijainen lämmitys on optimointia tekevissä kotitalouksissa merkittävä jouston keino. Kyselytutkimuksessa suuri osa vastaajista ilmoitti hyödyntävänsä puulämmitystä sähkön hinnan mukaan, mikä kertoo siitä, että vaihtoehtoiset lämmitysmuodot toimivat käytännössä joustavina ratkaisuina erityisesti kalliiden tuntien aikana. Johtopäätöksenä voidaan todeta, että toissijaiset lämmönlähteet parantavat kotitalouden mahdollisuuksia pienentää sähkölämmityksen tarvetta hintapiikkien aikana ja siten kasvattaa säästöpotentiaalia sekä vähentää riippuvuutta yksittäisestä energialähteestä. Samalla hyödyn toteutuminen riippuu käyttömahdollisuuksista ja arjen toimintatavoista, minkä vuoksi vaihtoehtoisten lämmitysmuotojen merkitys korostuu erityisesti niissä kotitalouksissa, joissa niitä voidaan käyttää säännöllisesti ja nopeasti osana ohjauslogiikkaa.

8.6 Sähköauton latauspotentiaali

Luvussa 3.6 on arvioitu keskimääräistä sähköauton (BEV ja PHEV) kotilataus-suoritetta vuodessa. Laskelmassa keskimääräiseksi kotilataus-suoritteeksi on saatu 1 796 kWh/a per auto. Vuoden 2024 keskihinnalla lataamiseen tarvittavan sähköenergian kustannus olisi 102 €. Jos lataus ajoitettaisiin vuorokauden kuuden halvimman tunnin ajalle, kustannussäästöä voisi kertyä suuruusluokaltaan 58 € vuodessa. Säästöpotentiaali on merkittävä erityisesti siksi, että lataus on useimmiten ajallisesti joustava kuorma ja se voidaan ohjata automaattisesti ilman suoraa vaikutusta asumismukavuuteen.

Taulukossa 9 on esitetty halvimpien kuuden tunnin jaksojen sijoittuminen vuorokauden tunneille. Suurin osa halvimmista jaksoista sijoittuu yöaikaan, eli aikaan, jolloin auton käyttö on tyypillisesti vähäisintä. Aurinkosähkön tuotannon kasvun myötä kesäaikaan on lisääntynyt halvimpien kuuden tunnin jaksojen sijoittuminen myös päiväajalle (klo 10–19). Tämä kannattaa huomioida latauslogiikkaa suunniteltaessa, jos on tärkeää, että auto on varmasti latautunut aamulla. Tällöin voidaan käyttää varmistuksena esimerkiksi pakotettua latausta klo 00–06 hinnasta riippumatta.

8.7 Optimoinnin kuormittavuus ja vaikutukset asumismukavuuteen

Kyselytutkimuksen perusteella sähkönkäytön optimointi koetaan useimmissa kotitalouksissa vain lievästi kuormittavaksi, ja päivittäinen ajankäyttö pörssihintojen seurantaan sekä asetusten säätämiseen jää tyypillisesti muutama minuutteihin. Tämä viittaa siihen, että optimointi toteutuu monilla rutiininomaisesti eikä edellytä jatkuvaa seurantaa. Kuormittavuuden kokemusta selittää osaltaan se, että optimointi kohdistetaan usein helposti ajastettaviin kuormiin ja toteutetaan ainakin osittain automaation avulla, jolloin käyttäjän rooliksi jää lähinnä asetusten seuranta ja satunnaiset korjaukset.

Asumismukavuuden näkökulmasta keskeisin koettu hyöty on parempi kustannusten hallinta, ja merkittävä osa vastaajista ei havaitse optimoinnin vaikuttavan mukavuuteen lainkaan. Samalla aineisto nostaa esiin tyypillisimmät haittavaikutukset: sisälämpötilan suurempi vaihtelu, arjen toimintojen ajoittumisen rajoitteet (esim. saunominen ja ruoanlaitto) sekä pienemmällä osalla lämpimän käyttöveden ajoittainen riittämättömyys ja yöaikaisten laitteiden melu. Johtopäätöksenä voidaan todeta, että optimoinnin laajempi käyttöönotto edellyttää ratkaisuja, jotka tuottavat taloudellista hyötyä ilman, että mukavuus heikkenee käyttäjän näkökulmasta kohtuuttomasti.

Tapausesimerkki konkretisoi, mistä kuormittavuus ja mukavuusvaikutukset käytännössä syntyvät. Halvimpien tuntien logiikka voi ajoittain johtaa ääripäihin sijoittuviin käyntijaksoihin: jos edellisen vuorokauden halvimmat tunnit ovat vuorokauden alussa ja seuraavan päivän halvimmat tunnit vuorokauden lopussa, lämmityskäyntien väliin voi muodostua poikkeuksellisen pitkä tauko.

Tapausesimerkissä tämä näkyi sisälämpötilan vaihtelun kasvuna (huoneesta ja vuodesta riippuen keskimäärin noin 0,2–0,7 °C) sekä ajoittain lämpimän käyttöveden lämpötilan laskuna normaalia alemmas; joissakin tilanteissa käyttöveden lämpötila laski alle 40 °C. Tämän perusteella voidaan todeta, että optimointilogiikan ajallinen rakenne ja varauskyky (rakenteet ja varaaja) ovat keskeisiä asumismukavuuden kannalta.

Kuormittavuuden näkökulmasta tapausesimerkki osoitti myös, että tekninen toteutus voi olla pääosin luotettava, mutta arkea voi kuormittaa ohjauksen manuaalinen työ: jos järjestelmä ei huomioi lämmitystarvetta automaattisesti, käyttäjän on säädettävä käyntituntien määrä olosuhteiden mukaan. Tällöin optimointi ei ole pelkästään ajastusta, vaan myös jatkuvaa arviointia siitä, riittääkö valittu käyntiaika vallitsevissa olosuhteissa. Tämä tukee johtopäätöstä siitä, että laajassa käyttöönötossa korostuvat ohjausratkaisut, jotka reagoivat automaattisesti lämmitystarpeen vaihteluun ja sisältävät selkeät mukavuusrajat.

Toisaalta tapausesimerkki osoitti, että tietyt kuormat voivat olla optimoinnin kannalta erittäin vaivattomia. Sähköauton lataus koettiin helpoksi, kun perusasetuksena oli kuuden halvimmman tunnin ohjaus ja poikkeustilanteet ratkaistiin nopeasti manuaalisesti. Käytännön haaste liittyi lähinnä kuormien yhteisvaikutukseen: kun auton lataus ajoittui samaan aikaan saunan kanssa, pääsulake-rajaa saattoi ylittyä. Tämä korostaa tarvetta ohjaukselle, joka sisältää kuormien priorisoinnin ja suojaukset (esim. sulakevahti), jotta optimointi ei lisää häiriötilanteita tai turvallisuusriskejä.

Yhteenvetona voidaan todeta, että sekä kyselytutkimus että tapausesimerkki osoittavat optimoinnin olevan useimmille kotitalouksille toteuttamiskelpoinen ja vain lievästi kuormittava toimintatapa, kun se on riittävän automatisoitu ja sisältää mukavuusrajat. Kuormittavuus ja asumismukavuuden heikkeneminen liittyvät tyypillisesti tilanteisiin, joissa ohjauslogiikka voi aiheuttaa pitkiä lämmityskatkoja, käyttöveden alilämpöä tai edellyttää käyttäjältä jatkuvaa tuntimäärän säätämistä. Näiden riskien hallinta edellyttää ohjaukselta vähintään minimirajoja (sisälämpötila ja käyttövesi), kuormien yhteisvaikutuksen huomiointia sekä lämmitystarpeeseen perustuvaa automaatiota, jolloin taloudellinen hyöty voidaan saavuttaa ilman merkittävää haittaa arjen sujuvuudelle.

8.8 Lämmitysjärjestelmien huippumitoitus ja käyttämätön kapasiteetti jouston lähteenä

Kotitalouksien lämmitysjärjestelmät mitoitetaan Suomessa lähtökohtaisesti pakkashuippujen mukaan (mitoituslämpötila), jotta sisälämpötila ja lämpimän käyttöveden riittävyys voidaan turvata myös kylmimpinä päivinä. Suurimman osan vuodesta ulkolämpötila on kuitenkin selvästi mitoituslämpötilaa korkeampi, mikä tarkoittaa, että järjestelmien koko kapasiteettia ei tarvita jatkuvasti. Tämä näkyy myös tässä työssä lasketussa kuukausitason tarkastelussa, jossa väestöpainotettu vuorokauden keskilämpötila ja siitä johdettu teoreettinen lämmitystarve vaihtelevat voimakkaasti vuodenaikojen mukaan (Ilmatieteen laitos, n.d.-b; Kuntaliitto, 2025). Tarkastelun keskeinen tulkinta ei ole yksittäinen tuntimäärä, vaan ilmiö: lämmitysjärjestelmien huippumitoitus luo merkittävän säätövaran, koska kuormaa voidaan monissa tilanteissa pienentää tai siirtää ajassa ilman, että asumismukavuus välittömästi heikkenee.

Taulukon 19 teoreettinen lämmitysaika on muodostettu samalla periaatteella kuin lämmitystarvelukulaskenta (HDD): vuorokauden keskilämpötilasta johdetaan lämmityskausi sekä lämmitystarpeen olemassaolo katkaisurajoilla (+10 °C / +12 °C), ja tämän jälkeen lämmitystarve muunnetaan käyttöajaksi suhteessa mitoituslämpötilaan ja peruslämpötilaan. Menetelmä on yksinkertaistettu, mutta se havainnollistaa kantaverkon tasapainotuksen kannalta olennaisen mekanismin: kun lämmityksen hetkellinen tarve on alle järjestelmän mitoituskapasiteetin, kuormaa voidaan joustaa sekä alaspäin että ylöspäin esimerkiksi ajoittamalla lämmityksen käyntiä vuorokauden sisällä, hyödyntämällä rakennuksen lämpökapasiteettia sekä varaajien varastointikykyä. Käytännön toteutusta rajaavat kuitenkin ohjauksen reunaehdot (asumismukavuus, käyttöveden riittävyys ja järjestelmätyypin ominaisuudet), minkä vuoksi jouston tekninen potentiaali ei sellaisenaan ole sama kuin markkinoille tarjottava säätökapasiteetti.

Taulukko 19. Suomen keskimääräinen lämmitystarve vuorokaudessa ja vuorokauden keskilämpötila

Kuukausi	Ulkolämpötila, °C	Teoreettinen lämmitysaika, h/vrk
2024-01	-9,32	14,02
2024-02	-4,54	11,47
2024-03	-0,17	9,16
2024-04	2,49	7,73
2024-05	13,1	0,03
2024-06	16,8	0
2024-07	18,46	0
2024-08	17,35	0
2024-09	14,09	0,02
2024-10	7,32	5,14
2024-11	2,32	7,82
2024-12	-1,18	9,67

8.9 Kotitalouksien joustopotentiali kantaverkon tasapainotuksessa

Tässä alaluvussa suhteutetaan kotitalouksien lämmityskuorman joustokapasiteettia kantaverkon tasapainotuksen mittakaavaan. Fingrid tasapainottaa sähköjärjestelmää reaaliajassa hankkimalla reservituotteita reserveihin ja säätömarkkinoille, jotta tuotanto ja kulutus pysyvät jatkuvasti tasapainossa.

Fingridin reservivelvoitteet ovat tyypillisesti satojen megawattien suuruusluokassa ja jakautuvat eri tuotteisiin vasteajan ja ohjaustavan mukaan. Esimerkiksi vuoden 2024 velvoitteissa taajuusohjatussa FCR-N-tuotteessa velvoite on 122 MW ja häiriöreserveissä FCR-D ylösäättö 295 MW ja alassäättö 240 MW. Lisäksi nopea taajuusreservi FFR on 0–60 MW ja automaattisen aFRR-reservin velvoite on tyypillisesti 46–62 MW sekä ylös- että alassäättösuuntaan (Fingrid, 2024a, s. 6).

Kun näitä kokoluokkia verrataan kotitalouksien lämmityksen tekniseen kapasiteettiin, havaitaan, että jo kohtuullinen osuus sähkölämmitteisten kotien lämmityskuormasta voisi periaatteessa tuottaa reservimarkkinoille satojen megawattien mittakaavan joustoa etenkin talvikaudella. Tässä työssä johdettu lämmitystarpeen kausivaihtelu (Taulukko 19) tukee johtopäätöstä, että suurin alassäättöpotentiali syntyy pakkasjaksoilla, jolloin lämmitys on aktiivinen ja kuormaa voidaan lyhytaikaisesti pienentää ilman välitöntä mukavuusvaikutusta.

On kuitenkin tärkeää erottaa tekninen potentiaali ja markkinoille toimitettava kapasiteetti. Käytännössä joustoa rajoittavat sisä- ja käyttövesilämpötilan reunaehdot, laitekohtaiset rajoitukset sekä hajautetun resurssin ohjauksen ja mittauksen vaatimukset. Markkinakelpoinen joustokapasiteetti edellyttää yleensä aggregointia ja toimivaa sopimus- ja tietomallia, jotta tuhansien kotitalouksien pienet tehot voidaan yhdistää yhdeksi luotettavaksi reserviksi.

Lisäksi kotitalouksien lämmitysjousto on voimakkaasti kausiluonteista: kesällä tilojen lämmitykseen ei juurikaan kulu energiaa, jolloin joustoa on haettava muista kuormista. Tällöin käyttöveden lämmitys, sähköauton lataus sekä yksittäisten kodin laitteiden ohjaus korostuvat ympäri vuoden käytettävissä olevina joustoresursseina.

Yhteenvetona kotitalouksien lämmityskuorma on suuruusluokaltaan erittäin merkittävä potentiaalinen joustoresurssi, mutta sen hyödyntäminen kantaverkon tasapainotuksessa edellyttää ohjauksen automatisointia, käyttäjien hyväksyntää sekä markkina- ja palvelumallien kypsymistä.

8.10 Vastaukset tutkimuskysymyksiin

1) Millä teknisillä ja käytännön keinoilla kotitaloudet voivat osallistua sähkönkulutuksen säätöön?

Keskeisiksi osallistumiskeinoiksi tunnistettiin lämmityksen ja lämpimän käyttöveden ajoitus (erityisesti vesikiertoiset järjestelmät ja lämpöpumput), sähköauton latauksen ajoitus sekä arjen kuormien (kodinkoneet ja sauna) ajastaminen. Toissijaiset lämmitysmuodot, erityisesti puulämmitys, toimivat käytännön joustokeinona kalliiden tuntien aikana. Ohjaus voidaan toteuttaa manuaalisesti, laitekohtaisilla ajastuksilla tai automaation avulla, mutta laajan käyttöönoton kannalta keskeistä on helppokäyttöisyys ja luotettavuus.

2) Kuinka suuri kotitalouksien joustopotentiaali voi olla valtakunnallisesti ja miten se vaihtelee kuormien ja asumismuodon mukaan?

Potentiaalin todettiin vaihtelevan merkittävästi asumismuodon ja ohjattavien kuormien mukaan. Kerrostaloasunnossa jousto kohdistuu pääosin pieniin kuormiin ja mahdollisiin sähköisiin lattialämmityksiin, jolloin euromääräinen

hyöty jää usein rajalliseksi. Omakotitaloissa, joissa lämmitys ja käyttövesi muodostavat kulutuksen pääosan, joustopotentiaali on selvästi suurempi ja koroostuu talvikaudella. Aggregoituna kotitalouksien jousto voi olla mittaluokaltaan relevantti myös järjestelmätasolla, mutta markkinoille toimitettava kapasiteetti on teknistä potentiaalia pienempi mukavuus- ja ohjausrajoitteiden vuoksi.

3) Miten kuormittavaksi jousto koetaan ja miten se vaikuttaa halukkuuteen osallistua?

Kyselyn perusteella optimointi koettiin useimmiten vain lievästi kuormittavaksi ja ajankäyttö jää tyypillisesti muutamiin minuutteihin päivässä. Keskeiset hyväksyttävyyttä heikentävät tekijät liittyvät mukavuusvaikutuksiin (sisälämpötilan vaihtelu, arjen ajoitusrajoitteet, käyttöveden riittävyys) ja tilanteisiin, joissa ohjaus edellyttää käyttäjältä jatkuvaa säätämistä. Tapausesimerkki osoittaa, että ohjauksen suunnittelussa on vältettävä liian pitkiä katkoja ja varmistettava vähimmäisrajat.

4) Millaiset teknologiat ja toimintamallit tukevat parhaiten laajaa käyttöönottoa?

Laaja käyttöönotto edellyttää ratkaisuja, jotka ovat läpinäkyviä ja käyttäjän hallittavissa (mukavuusrajat ja helppo ohitus), vikasietoisia sekä riittävän automaattisia, jotta manuaalinen säätö vähenee. Markkinatasolla kotitalouksien osallistuminen reservi- ja säätömarkkinoille edellyttää aggregointia sekä toimivia mittaus-, ohjaus- ja sopimusmalleja, jotta hajautetusta joustosta muodostuu luotettava ja markkinakelpoinen kokonaisuus.

9 POHDINTA

Pohdintaosuudessa kootaan työn keskeiset havainnot ja tarkastellaan niitä laajemmassa kontekstissa: mitä tulokset tarkoittavat kotitalouksien arjen, sähkömarkkinan ja sähköjärjestelmän kannalta sekä mitkä tekijät käytännössä mahdollistavat tai estävät jouston laajamittaisen käyttöönoton. Luvussa peilataan tapausesimerkin ja kyselyaineiston kautta esiin nousseita teemoja (mm. kuormittavuus, luotettavuus ja ohjauksen yksinkertaistaminen) siihen, millaisia vaatimuksia integraatio, palvelumallit, tietosuoja ja toimijoiden roolit asettavat tuleville ratkaisuille. Lisäksi arvioidaan työn rajoitteita ja tulosten yleistettävyyttä, esitetään kehityssuosituksia sekä reflektoidaan opinnäytetyöprosessia ja omaa kehittymistä.

9.1 Ehdot laajalle käyttöönotolle

Kotitalouksien sähkönkäytön jouston laajamittainen käyttöönotto ei näyttäydä ensisijaisesti teknologian puutteena, vaan kokonaisuuden hallinnan ongelmana. Työn tulokset tukevat havaintoa, että peruskyvykkyys (mittaus, ohjaus ja hintatiedon hyödyntäminen) on jo olemassa, mutta ratkaisut jäävät usein laitekohtaisiksi, erillisiksi ja käyttäjää kuormittaviksi. Kun ohjaus perustuu ennalta määrättyihin tunteihin tai yksittäiseen palveluun, se ei huomioi riittävässä määrin lämmitystarvetta, säätilaa, muiden kuormien samanaikaisuutta tai tehorojoja – eikä siten tuota tasaista ja ennustettavaa hyötyä arjessa.

Jotta jousto skaalautuu laajalle käyttäjäjoukolle, ohjauksen on muututtava käyttäjälle mahdollisimman huomaamattomaksi ja toimintavarmaksi. Käytännössä tämä tarkoittaa, että käyttäjä määrittelee vain tavoitteet ja rajat (esim. sisälämpötilan vaihteluväli, käyttöveden vähimmäislämpö, auton lähtöaika ja haluttu varaustaso), ja järjestelmä optimoi automaattisesti näiden sisällä. Tällöin ohjaus ei voi perustua pelkkään tuntihintaan, vaan sen on oltava kontekstiohjattua: sääennuste, rakennuksen lämpökapasiteetti, lämmitysjärjestelmän ominaisuudet sekä muiden kuormien samanaikaisuus vaikuttavat siihen, mikä ohjaus on sekä taloudellisesti että mukavuuden kannalta järkevää.

Laaja käyttöönotto edellyttää, että ratkaisuja kehitetään kohti tuotteistettuja ja modulaarisia kokonaisuuksia, jotka toimivat erilaisissa kotitalouksissa ilman pitkää säätö- ja viritysjaksoa. Käytännössä tämä tarkoittaa:

- käyttöönoton automatisointia ja valmiita laiteprofiileja
- useiden kuormien yhteisoptimointia tehorajojen puitteissa
- ennusteiden (sää, lämpömassa, mahdollinen oma tuotanto) parempaa hyödyntämistä
- hyötyraportointia, joka näyttää nettohyödyn läpinäkyvästi ja huomioi myös reunaehdot, kuten siirtomaksujen alueelliset erot ja mahdollisen hyötysuhdevaikutuksen.

Näin käyttäjälle voidaan tarjota selkeä arvolupaus: automaatio vähentää vai-
vaa, parantaa ennustettavuutta ja pitää asumismukavuuden hallinnassa. Sa-
malla on huomioitava, että kotitaloudet ovat aidosti uniikkeja järjestelmiä. Ker-
rostaloasukkaan joustopotentiaali jää usein pienemmäksi, koska lämmitys-
muoto ja ohjausmahdollisuudet ovat rajalliset, kun taas omakotitalossa erityi-
sesti lämmitys ja sähköauton lataus voivat tuoda sekä suurimmat hyödyt että
suurimmat riskit asumismukavuudelle. Tästä syystä yksi ratkaisu kaikille ei ole
realistinen tavoite, vaan järjestelmien on mukauduttava kotitalouden olosuh-
teisiin ja käyttäjän tavoitteisiin. Käytännössä tämä tarkoittaa valmiita profiileja
ja automaattista käyttöönottoa, mutta myös sitä, että todellinen nettohyöty on
pystyttävä osoittamaan läpinäkyvästi. Pelkkä halpoin tunteihin siirtäminen ei
riitä, jos kokonaisuus heikentää hyötysuhdetta tai jos alueelliset siirtomaksut
muuttavat optimoinnin kannustimia. Ilman selkeää ja luotettavaa hyötyä inves-
tointikustannusten sekä vaivannäön perustelu jää epävarmaksi, ja juuri tämä
näyttyy monelle kotitaloudelle keskeisenä kynnyskysymyksenä.

9.2 Luottamus ja palvelumallit

Kotitalouksien jouston laajentuminen ei ole pelkästään tekninen tai taloudelli-
nen kysymys, vaan myös luottamuskysymys. Kun ohjaus kohdistuu kodin kriit-
tisiin kuormiin (lämmitys, käyttövesi, lataus), käyttäjän hyväksyntä perustuu sii-
hen, että järjestelmä on ennakoitava, turvallinen ja käyttäjän hallittavissa. Luot-
tamus syntyy käytännössä kolmesta elementistä: läpinäkyvyydestä,

vikasietoisuudesta ja hallinnan tunteesta. Käyttäjän pitää ymmärtää, mitä ohjataan ja miksi, järjestelmän pitää toimia järkevästi myös häiriötilanteissa (esim. yhteyskatkot ja puuttuva hintadata), ja käyttäjällä pitää olla selkeä tapa asettaa rajat sekä ohittaa automaatio tarvittaessa.

Palvelumallien näkökulmasta nykyinen kenttä jakautuu karkeasti kolmeen:

- DIY- ja osittain integroidut ratkaisut
- yksittäiseen laitteeseen tai palveluun sidotut ohjaukset
- tuotteistetut “avaimet käteen” -kokonaisuudet

DIY-ratkaisuilla voidaan saavuttaa hyviä tuloksia ja ne mahdollistavat yksilöllisen optimoinnin, mutta ne myös lisäävät kuormittavuutta ja altistavat toiminnan ylläpidon osaamis- ja aikaresursseille. Laajassa mittakaavassa tämä tarkoittaa, että osallistuminen jää herkästi aktiivisten harrastajien varaan. Siksi jouston arkipäiväistyminen edellyttää yhä enemmän tuotteistettuja palveluja, joissa käyttöönotto on helppoa, toiminta on luotettavaa ja hyöty on todennettavissa ilman jatkuvaa säätämistä.

Aggregaattorin rooli korostuu silloin, kun jousto halutaan muuttaa yksittäisen kotitalouden optimoinnista osaksi laajempaa kokonaisuutta. Aggregaattori voi yhdistää pienet resurssit markkinakelpoiseksi volyymiksi ja tarjota samalla kotitaloudelle helpon osallistumistavan. Jotta tämä olisi hyväksyttävää, palvelumallin pitää olla reilu ja selkeä: mitä asiakas luovuttaa (ohjausoikeus tietyissä rajoissa, data), mitä asiakas saa (hyöty ja mahdolliset korvaukset) ja miten riskit hallitaan (mukavuus, laitteiden käyttö ja häiriötilanteet). Lisäksi jakeluverkonhaltijan näkökulma voi tulevaisuudessa vahvistua: jos joustoja tarvitaan paikallisten kuormitushuippujen hallintaan, syntyy tarve yhteisille pelisäännöille ja signaaleille, jotka eivät lisää asiakkaan monimutkaisuutta vaan tukevat automaatiota.

9.3 Jatkokehitys ja suositukset

Työn perusteella keskeinen kehityssuunta on siirtyminen yksittäisistä, erillisistä ohjauksista kohti kokonaisuuksia, joissa ohjaus on helppo ottaa käyttöön, toimintavarma ja kotitalouden reunaehdot huomioiva. Jatkokehitystä voidaan

tarkastella sekä teknisenä että toiminnallisena polkuna, jossa ratkaisuja pilotoidaan laajemmalla kotitalousjoukolla ja samalla kehitetään palvelumalleja, joilla osallistuminen muuttuu vaivattomaksi.

Seuraavat suositukset tukevat laajaa käyttöönottoa:

- Yhteisoptimointi ja kuormien koordinointi: lämmityksen, käyttöveden ja latauksen ohjaus tulisi suunnitella yhtenä kokonaisuutena tehorajojen puitteissa. Tämä vähentää päällekkäistä "halvat tunnit" -ajoa ja parantaa ennustettavuutta.
- Ennusteohjaus ja reunaehtojen mallinnus: sääennusteen, rakennuksen lämpökapasiteetin ja lämmitysjärjestelmän ominaisuuksien (mm. hyötysuhde käyttötilanteissa) huomiointi vähentää mukavuusriskiä ja auttaa välttämään tilanteita, joissa säästö heikentää kokonaisuutta.
- Vikasietoisuus ja turvalliset oletusarvot: järjestelmän on toimittava järkevästi myös poikkeustilanteissa (yhteyskatkot, datavirheet). Käyttöönotossa tämä on usein tärkeämpää kuin paras mahdollinen optimointi.
- Avoimet rajapinnat ja laiteprofiilit: käyttöönoton automatisointi (valmiit profiilit eri kotityypeille ja laitteille) vähentää kuormittavuutta ja tekee tuotteistamisesta realistista.
- Hyötyraportointi ja läpinäkyvyys: palvelun tulisi raportoida nettohyöty selkeästi ja kotitalouskohtaisesti (mukaan lukien siirtomaksujen vaikutus ja mahdolliset hyötysuhdevaikutukset). Tämä parantaa luottamusta ja auttaa perustelemaan investointia.
- Tietosuoja ja kontrolli oletuksena: minimoida datan keruu, selkeä käyttöoikeuksien hallinta ja käyttäjän mahdollisuus rajata ohjausta (sekä ohittaa se) ovat olennaisia hyväksyttävyyden kannalta.
- Pilotointi eri kotitaloustyypeillä: jotta tulokset ovat vahvemmin yleistettävissä, jatkokehityksessä kannattaa testata ratkaisuja erikokoisissa ja eri lämmitysmuotoja edustavissa kohteissa (kerrostalo/omakotitalo, kaukolämpö/sähkölämmitys/lämpöpumppu).

Jatkokehityksen kannalta on myös hyödyllistä asettaa selkeä tavoite: jouston pitäisi olla kotitaloudelle huomaamatonta, ei jatkuvaa seuraamista. Tämä edellyttää, että tekninen toteutus ja palvelumalli tukevat toisiaan: tekniikka tuottaa ohjauksen luotettavasti ja palvelu tekee hyödyn näkyväksi, mutta ei siirrä

optimointivastuuta käyttäjälle. Kun nämä ehdot täyttyvät, jousto voi laajentua harrastuneisuudesta kohti arkipäiväistä, laajasti hyväksytyä toimintaa.

9.4 Työn rajoitteet ja tulosten yleistettävyys

Työn vahvuus on monimenetelmällisyys, jossa kirjallisuuskatsaus, hintadata-analyysi, tapausesimerkki ja kyselytutkimus täydentävät toisiaan. Samalla aineistot sisältävät rajoitteita, jotka on huomioitava tulosten tulkinnassa. Ensinnäkin kyselyaineisto ei ole satunnaisotos suomalaisista kotitalouksista, vaan se painottuu kotitalouksiin, joita aihe jo valmiiksi kiinnostaa. Tämä korostaa optimointia tekevien käytäntöjä ja voi yliarvioida valmiuksia laajassa väestössä. Toiseksi kysely sisältää itsearvioituja arvioita ajankäytöstä ja säästöistä, jolloin vastaajien tulkinnat ja muistivirheet voivat vaikuttaa tuloksiin. Kolmanneksi tapausesimerkki perustuu yhteen kohteeseen, joten tuloksia ei tule suoraan yleistää kaikkiin rakennustyyppeihin ja lämmitysjärjestelmiin. Tapaus kuitenkin toimii käytännön todentavana esimerkkinä siitä, miten ohjaus, mukavuus ja luotettavuus kytkeytyvät toisiinsa.

Jatkotutkimuksen kannalta keskeisiä teemoja ovat (1) laajempi ja edustavampi kyselyotos, (2) useampien tapauskohteiden vertailu eri lämmitysmuodoilla, (3) lämpöpumpun hyötysuhteen (COP) vaikutusten mittaaminen ohjauksen eri strategioissa sekä (4) kokonaissähkölaskun näkökulma, jossa siirto ja muut maksut huomioidaan systemaattisesti.

9.5 Tapauskohteen jatkokehitys koejakson jälkeen: kohti autonomista ja vikasietoista ohjausta

Koejakson päättymisen jälkeen ohjausratkaisua kehitettiin käytännön havaintojen perusteella. Pilvipalvelupohjaisen ohjauksen suurimmaksi haasteeksi todettiin lämmitystarpeen vaihtelun huomiointi: sopiva käyntituntimäärä vaihteli ulkolämpötilan ja käyttöveden tarpeen mukaan, mikä lisäsi manuaalista säätöä. Tämän vuoksi ohjauslogiikka siirrettiin paikallisesti toimivaan Home Assistant -ympäristöön, joka ajetaan omalla palvelimella.

Jatkokehityksessä maalämpöpumpun ohjaukselle määriteltiin ulkolämpötilaan sidottu 1–4 käyttöjaksoa vuorokaudessa, millä pyrittiin tasaamaan sisälämpötilaa ja estämään lämpimän käyttöveden lämpötilan lasku liian alas. Sähköauton lataus tuotiin samaan ohjaukseen siten, että latausta ohjataan edullisimpien tuntien lisäksi aurinkotuotannon ylijäämän mukaan ja lisäksi varmistetaan lataus yöllä klo 00–06, jotta akku on aamulla täysi. Käytännön luotettavuutta parannettiin lisäämällä pääsulakevahti: jos minkä tahansa vaiheen virta ylittää 25 A, auton lataus kytketään pois päältä. Lisäksi syksyllä 2025 maalämpöpumpun ohjelmistopäivityksen jälkeen otettiin käyttöön valmistajan Thermia Smart Price -pörssiohjaus, jonka tavoitteena on vähentää ulkoisen ohjauksen tarvetta.

Tässä työssä koejakson jälkeinen jatkokehitys kuvataan erillisenä pohdintana, eikä sitä sisällytetä koejakson mittaustuloksiin. Se kuitenkin havainnollistaa, miten koejakson aikana esiin nousseet vaivannäköön, mukavuuteen ja vikasietoisuuteen liittyvät tekijät ohjaavat ratkaisujen kehitystä kohti autonomisempaa ja toimintavarmempaa järjestelmää.

9.6 Opinnäytetyöprosessin reflektointi ja oma kehittyminen

Opinnäytetyöprosessi kehitti omaa osaamistani erityisesti kolmen osa-alueen kautta: (1) sähköjärjestelmän ja markkinoiden ilmiöiden ymmärtäminen käytännön ohjauksen lähtökohtana, (2) datalähtöinen analyysi ja tulosten todennettavuus sekä (3) automaattoratkaisun suunnittelu ja arviointi käyttäjän näkökulmasta.

Kirjallisuuskatsaus ja markkinaympäristön tarkastelu syvensivät ymmärrystä siitä, että jousto ei ole pelkkä kotiautomaatio-ongelma, vaan se kytkeytyy markkinarakenne- ja järjestelmäfyysiikkaan, reservien vaatimuksiin sekä datan ja roolien (TSO/DSO/myyjä/aggregointi) yhteensovittamiseen. Prosessin aikana opin myös kriittisyyttä lähteiden käyttöön: erityisesti viranomais- ja kantaverkkolähteissä oli olennaista viitata oikeaan kohtaan tai sivunumeroon, jotta väitteet ovat tarkistettavissa.

Hintadata-analyysi ja tapausesimerkki kehittivät analyysiosaamista. Tuntihintadatan käsittely (aikaleimat, ALV-muunnokset, tunnusluvut ja jakaumat)

korosti sitä, että pieniltäkin näyttävät määrittelyvalinnat voivat vaikuttaa tuloksiin. Tapausesimerkissä opin rajaamisen merkityksen: kaikki kiinnostava (esim. siirtomaksut, COP:n muutokset ja laitekohtaiset erot) ei mahdu samaan analyysiin ilman, että tutkimusketju muuttuu epäselväksi. Samalla tapaus opetti, että käytännön järjestelmissä luotettavuus ja vikasietoisuus ovat usein käyttäjälle tärkeämpiä kuin teoreettisesti paras optimointi.

Kyselytutkimus kehitti metodista osaamista: kysymysten muotoilu, monivalintojen tulkinta ja aineiston vinoumien tunnistaminen vahvistivat ymmärrystä siitä, miten haastavaa on yleistää tuloksia kotitalouksien tasolla. Aineisto myös korosti ihmistekijöiden merkitystä: hyväksyttävyyden, hallinnan tunne ja koettu vaivannäkö vaikuttavat käyttöönottoon yhtä paljon kuin tekninen toteutettavuus.

Kirjoitusprosessi kehitti tieteellisen tekstin jäsentämistä. Erityisesti luvut 6–8 opettivat erottamaan menetelmän, tulokset ja tulkinnan toisistaan, jotta työ ei muutu päiväkirjaksi vaan säilyy todennettavana ja lukijalle selkeänä. Itsenäisen tekstin tarkastelun ja oman oponoinnin kautta opin tiivistämään ja poistamaan toistoa: sama ilmiö voidaan kuvata yhdessä luvussa teoreettisesti ja toisessa soveltavasti, kun viittaukset ja rajaukset pidetään selkeinä.

Jos työ tehtäisiin uudelleen, panostaisin alusta lähtien kahteen asiaan: (1) useampaan tapauskohteeseen tai vertailuun eri lämmitysmuodoilla, jotta tulosten yleistettävyyden vahvistuisi, ja (2) hyötyraportoinnin standardointiin, jossa energian hinta, siirto ja mahdollinen hyötysuhdevaikutus erotetaan selkeästi. Näin olisi helpompaa osoittaa nettohyöty ja verrata eri ohjausstrategioita keskenään.

Kokonaisuutena opinnäytetyö vahvisti kykyä yhdistää sähköjärjestelmän ilmiöitä käytännön automaatioon ja käyttäjän arkeen. Samalla oma käsitys hyvän joustoratkaisun kriteereistä tarkentui: teknisesti toimiva ohjaus ei vielä riitä, vaan ratkaisun on oltava luotettava, läpinäkyvä, käyttäjän hallittavissa ja arjessa vaivaton, jotta se voi skaalautua laajasti.

9.7 Eettiset näkökohdat ja tekoälyn vastuullinen käyttö

Tässä opinnäytetyössä noudatettiin hyvää tieteellistä käytäntöä sekä tietosuojan ja tutkimusetiikan periaatteita. Kysely toteutettiin anonyymisti eikä henkilötietoja kerätty, minkä vuoksi yksittäisten vastaajien tunnistaminen ei ollut mahdollista. Aineistoa käsiteltiin ja raportoitiin siten, että tulokset esitettiin koontina, ja työn rajaukset sekä epävarmuustekijät tuotiin näkyviin. Tämä parantaa tulosten arvioitavuutta ja vähentää virheellisen yleistämisen riskiä.

Tekoälyä hyödynnettiin työssä työvälineenä vastuullisesti. Tekoälyn käyttö liittyi erityisesti (1) laajojen aineistojen käsittelyä tukevien Python-ohjelmien kehittämiseen, (2) lähdehaun suuntaamiseen ja aihekokonaisuuksien jäsentämiseen sekä (3) tekstin kieliasun ja johdonmukaisuuden parantamiseen. Keskeistä oli, että vastuu tuloksista, laskennasta, tulkinnasta ja lähteistä säilyi tekijällä: tekoälyä ei käytetty tutkimustulosten lähteenä, vaan sen tuottamat ehdotukset tarkistettiin ja varmistettiin omilla kontrollilaskelmilla ja lähteisiin perustuvalla tarkistuksella. Tekoälyn hyödyntäminen pienensi manuaalisen käsittelyn työmäärää ja auttoi vähentämään inhimillisten virheiden riskiä erityisesti silloin, kun käsiteltiin suuria aikasarja-aineistoja ja useita samanaikaisia muuttujia.

Lisäksi eettisyys huomioitiin tulosten tulkinnassa ja yleistämisessä. Kotitalouksien osallistumisen vaikutusta koko maan kulutukseen tai kantaverkon tasapainoon on vaikea arvioida tarkasti, koska ilmiöön vaikuttaa samanaikaisesti useita muuttujia (esim. sää, lämmitystavat, asumismuodot, ohjausratkaisut ja käyttäjäryhmien erot) ja sähkönkulutus vaihtelee voimakkaasti vuodenaikojen mukaan. Näistä syistä valtakunnallista vaikutusta koskevat johtopäätökset esitettiin tarkoituksella karkeina suuruusluokka-arvioina, eikä työssä pyritty antamaan yksiselitteisiä tai tarkkoja ennusteita. Tällä tavalla vältettiin perusteeton yleistys ja tehtiin näkyväksi se, missä määrin tulokset perustuivat aineistoon ja missä määrin ne olivat arvioita.

9.8 Tulosten odotustenmukaisuus ja yllättävät havainnot

Työn tulokset olivat rahallisen hyödyn suuruusluokan osalta pääosin odotustenmukaisia. Hintavaihteluun perustuvalla ajoituksella ja joustolla voidaan saavuttaa hyötyä, mutta käytännön toteutukseen liittyvät reunaehdot – kuten mukavuus, luotettavuus ja automaation hallittavuus – rajaavat sitä, kuinka aggressiivisesti optimointia voidaan soveltaa arjessa. Tämä korostaa, että tekninen potentiaali ei automaattisesti muutu toteutuneeksi joustoksi ilman helppokäyttöisiä ratkaisuja ja käyttäjälle ymmärrettävää ohjauslogiikkaa.

Työn aikana esiin nousi kuitenkin havaintoja, jotka tarkensivat optimointistrategian ymmärrystä. Erityisesti lämpöpumpun hyötysuhteen (COP) lämpötilariippuvuuden merkitys konkretisoitui aiempaa selvemmin: kylmimpinä jaksoina pelkkä halvimpien tuntien logiikka ei välttämättä tuota parasta kokonaisratkaisua, jos hyötysuhde heikkenee ja samalla kasvaa riski sisälämpötilan tai käyttöveden tavoiterajojen alittumisesta. Tämän vuoksi optimointiin on perusteltua sisällyttää myös lämpötilaan ja järjestelmän toimintarajoihin sidottuja ehtoja.

Kyselyaineisto täydensi kokonaiskuvaa erityisesti niissä tilanteissa, joissa aktiivista optimointia ei tehdä. Ennako-odotuksena oli, että suurimmat esteet liittyisivät ratkaisujen luotettavuuteen tai tietosuojaan, mutta kyselyssä korostuivat selkeämmin koetun taloudellisen hyödyn epäselvyys sekä asumismukavuuteen liittyvät huolet. Näiden lisäksi esiin nousivat optimoinnin koettu monimutkaisuus ja ratkaisujen kustannukset, ja osa vastaajista suhtautui optimointiin lähtökohtaisesti haluttomasti. Ajan puute ja tekniset tai asumismuotoon liittyvät rajoitteet näyttäytyivät yksittäistapauksina, eikä tietosuoja tai kyberturva muodostunut tässä aineistossa keskeiseksi esteeksi.

Vaikka hallinnan tunne tai ohjauksen läpinäkyvyys eivät kyselyssä nousseet esiin erillisinä esteinä, työn reunaehdotarkastelu tukee niiden merkitystä hyväksyttävyyden kannalta. Käytännössä tämä tarkoittaa, että käyttäjälle on tarjottava selkeät mukavuus- ja minimirajat, ymmärrettävät perustelut ohjaukselle sekä helppo ohitusmahdollisuus. Lisäksi vikaturvallinen toimintatapa (fail-safe) on tärkeä, jotta lämmityksen ja käyttöveden minimirajat toteutuvat myös häiriötilanteissa.

Tulokset tukevat aiemmassa kirjallisuudessa esitettyä näkemystä siitä, että kotitalouksien joustopotentiali on teknisesti merkittävä, mutta sen hyödyntäminen edellyttää hyväksyttäviä ja käyttäjälle läpinäkyviä ratkaisuja. Tässä työssä havaittu optimoinnin vähäinen koettu kuormittavuus poikkeaa osin ennakkoodotuksista ja viittaa siihen, että automaation kypsyyden ja helppokäyttöisyyden voivat alentaa käyttäytymiseen liittyviä esteitä aiemmin oletettua enemmän.

LÄHTEET

- Blakadder. (n.d.). Tasmota Supported Devices Repository. Haettu 11.1.2026 osoitteesta <https://templates.blakadder.com/>
- Caruna. (2024). Sähköautokysely. <https://caruna.fi/sites/default/files/docs/Carunan%20s%C3%A4hk%C3%B6autokysely.pdf>
- Daly, M., Langham, E., Tahir, F., Allen, S., & Briggs, C. (2025). *Residential HEMS and controllers – global market scan*. Institute for Sustainable Futures. https://www.iea-4e.org/wp-content/uploads/2025/01/DF6_HEMS-market-scan_Final.pdf
- Energiateollisuus. (30.12.2024). Sähkön hintatilastot 2024. https://energia.fi/wp-content/uploads/2024/12/Sahkon-hintatilastot-2024_20241230.pdf
- Energiateollisuus. (n.d.-a). Tuulivoima. Haettu 28.9.2025 osoitteesta <https://energia.fi/energiatietoa/energiantuotanto/sahkontuotanto/tuulivoima>
- Energiateollisuus. (n.d.-b). Sähköverkot. Haettu 28.9.2025 osoitteesta <https://energia.fi/energiatietoa/energiaverkot/sahkoverkot/>
- Energiavirasto. (2023). Sähkön jakelu — Menetelmäliite (valvontamenetelmät 2024–2031). <https://urly.fi/41Ve>
- Energiavirasto. (2025a). Päätös itsenäisen aggregaattorin aktivoimasta kulusjoustosta aiheutuvien kustannusten korvaamisen laskentamenetelmästä, Fingrid. <https://urly.fi/41Vf>
- Energiavirasto. (2025b). Sähkön jakelutariffien ja niiden rakenteiden kehitys 2020–2025. <https://urly.fi/41Vg>
- Energiavirasto. (10.7.2025c). Pörssisähkö reilulla kolmasosalla kotitalouksista – määräaikaiset yhä yleisin sopimustyyppi vuonna 2024. <https://urly.fi/41Vi>
- Energiavirasto. (n.d.-a). Näin sähkölaskusi muodostuu. Haettu 30.12.2025 osoitteesta <https://energiavirasto.fi/-/nain-sahkolaskusi-muodostuu>
- Energiavirasto. (n.d.-b). Sähkönmyyjän vaihto. Haettu 30.12.2025 osoitteesta <https://energiavirasto.fi/sahkonmyyjan-vaihto>
- eSett. (6.9.2023). Commissioning Plan: 15 min Imbalance Settlement Re-piod. https://www.esett.com/app/uploads/2023/09/15_min_Commissioning_Plan.pdf
- eSett. (5.5.2025). Pohjoismaisen taseselvityksen käsikirja: Ohjeet ja säännöt markkinaosapuolille (Versio 5.1) [Epävirallinen käänös]. Haettu 4.1.2026 osoitteesta <https://www.esett.com/app/uploads/2025/05/NBS-Kasikirja-Suomi-5.1.pdf>

ESPHome Devices. (n.d.). ESPHome Device Configuration Repository. Haettu 11.1.2026 osoitteesta <https://devices.esphome.io/>

Fell, M. J., Shipworth, D., Huebner, G. M. & Elwell, C. A. (2015). Public acceptability of domestic demand-side response in Great Britain: The role of automation and direct load control. *Energy Research & Social Science*, 9, 72–84. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2015.08.023>

Fingrid. (22.5.2023a). Nopean taajuusreservin (FFR) teknisten vaatimusten todentaminen ja hyväksyttämisprosessi. <https://urly.fi/41Vj>

Fingrid. (23.11.2023b). Sähkömarkkinoilla erikoinen tilanne perjantaina – hinta ei ohjaa tuotantoa ja kulutusta oikein. Haettu 12.10.2025 osoitteesta <https://www.fingrid.fi/ajankohtaista/tiedotteet/2023/sahkomarkkinoilla-erikoinen-tilanne-perjantaina--hinta-ei-ohjaa-tuotantoa-ja-kulutusta-oikein/>

Fingrid. (2024a). Reserveistä ja reservimarkkinoista. <https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/sahkomarkkinat/reservit/reservien-perusteet.pdf>

Fingrid. (17.9.2024b). Sähkön riittävyys tulevana talvena edellyttää luotettavaa kotimaista tuotantoa ja tuontia. <https://urly.fi/41Vk>

Fingrid. (10.3.2025a). Päivänsisäinen markkina siirtyy Pohjoismaissa vartiin 18. maaliskuuta. <https://www.fingrid.fi/ajankohtaista/tiedotteet/2025/paivansisainen-markkina-siirtyy-pohjoismaissa-vartiin-18.-maaliskuuta/>

Fingrid. (2025b). Itsenäisen aggregoinnin työryhmän loppuraportti. <https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/tiedotteet/ajankohtaista/itsenaisen-aggregoinnin-tyoryhman-loppuraportti.pdf>

Fingrid. (n.d.-a). Suomen sähköjärjestelmä. Haettu 28.9.2025 osoitteesta <https://www.fingrid.fi/kantaverkko/kehittaminen/suomen-sahkojarjestelma/>

Fingrid. (n.d.-b). mFRR, manuaalinen taajuuden palautusreservi. Haettu 13.1.2026 osoitteesta <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit/reservituotteet-ja-markkinoille-osallistuminen/mfrr-manuaalinen-taajuuden-palautusreservi/>

Fingrid. (n.d.-c). Sähköjärjestelmän reservit. Haettu 28.9.2025 osoitteesta <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit/sahkojarjestelman-reservit/>

Fingrid. (n.d.-d). Datahub. Haettu 28.9.2025 osoitteesta <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/datahub/>

Fingrid. (n.d.-e). Kirjautuminen datahubin asiakasportaaliin. Haettu 28.9.2025 osoitteesta <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/datahub/kirjautuminen-datahubin-asiakasportaaliin/>

Fingrid. (n.d.-f). FFR, nopea taajuusreservi. Haettu 28.9.2025 osoitteesta <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit/reservituotteet-ja-markkinoille-osallistuminen/ffr-nopea-taajuusreservi/>

- Fingrid. (n.d.-g). Kotitaloudet sähkön reservimarkkinoilla. Haettu 18.12.2025 osoitteesta <https://www.fingrid.fi/yhtio/kuluttajietoa/kotitaloudet-sahkon-reservimarkkinoilla>
- Fingrid. (n.d.-h). Opas kulutusjoustoan Hallitse kotisi sähkönkulutusta. Haettu 18.12.2025 osoitteesta https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/julkaisut/opas_kulutusjoustoan.pdf
- Fingrid. (n.d.-i). FCR, taajuusohjattu käyttö- ja häiriöreservi. Haettu 13.1.2026 osoitteesta <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit/reservituotteet-ja-markkinoille-osallistuminen/fcr-taajuusohjattu-kaytto--ja-hairioreservi/>
- Fingrid. (n.d.-j). aFRR, automaattinen taajuuden palautusreservi. Haettu 13.1.2026 osoitteesta <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit/reservituotteet-ja-markkinoille-osallistuminen/afrr-automattinen-taajuuden-palautusreservi/>
- Fortum. (n.d.-a). Sähkölasku kuukaudessa – ja näin siihen voi vaikuttaa. Haettu 18.10.2025 osoitteesta <https://www.fortum.com/fi/sahkoa/vinkit/sahkolasku-kuukaudessa>
- Fortum. (n.d.-b). Sähkönkulutus kotona. Haettu 18.10.2025 osoitteesta <https://www.fortum.com/fi/sahkoa/vinkit/sahkonkulutus-kotona>
- Heatherly, M., Baker, D. A. & Canfield, C. (2023). Don't touch that dial: Psychological reactance, transparency, and user acceptance of smart thermostat setting changes. PLOS ONE, 18(7), e0289017. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0289017>
- Helen. (10.3.2025). Millainen sähkösopimus sopii mökille? <https://www.helen.fi/sahko/sahkosopimus/sahkosopimukset/millainen-sahkosopimus-sopii-mokille-2025>
- Home Assistant. (n.d.). Integrations. Haettu 11.1.2026 osoitteesta <https://www.home-assistant.io/integrations/>
- Ilmatieteen laitos. (n.d.-a). Lämmitystarveluku eli astepäiväluku. Haettu 23.11.2025 osoitteesta <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/lammitystarveluvut>
- Ilmatieteen laitos. (n.d.-b). Havaintojen lataus. Haettu 23.11.2025 osoitteesta <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/havaintojen-lataus>
- International Energy Agency. (2024). Global EV Outlook 2024. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/a9e3544b-0b12-4e15-b407-65f5c8ce1b5f/GlobalEVO Outlook2024.pdf>
- Kajave. (2026). Verkkopalveluhinnasto. https://kajave.fi/sites/default/files/2025-12/kajave_hinnasto_verkkopalvelu.pdf
- Keravan Energia. (n.d.). Sähkönsiirron hinnasto – Kerava. Haettu 30.12.2025 osoitteesta <https://www.keravanenergia.fi/sahko/hinnastot-ja-sopimusehdot/hinnasto-sahkonsiirto-kerava/>

Kuntaliitto. (4.4.2025). Kaupunkien ja kuntien lukumäärät ja väestötiedot. Haettu 1.1.2026 osoitteesta <https://www.kuntaliitto.fi/kuntaliitto/tietotuotteet-ja-palvelut/kaupunkien-ja-kuntien-lukumaarat-ja-vaestotiedot>

Lumme Energia. (11.10.2021). Kuinka paljon sähköä kuluu omakotitalossa? <https://www.lumme-energia.fi/blogi/sahkon-kulutus-omakotitalossa/>

Lumme Energia. (19.6.2023a). Kuinka paljon sähköä kuluu kerrostalossa? <https://www.lumme-energia.fi/blogi/kuinka-paljon-sahkoa-kuluu-kerrostalossa/>

Lumme Energia. (28.6.2023b). Kuinka paljon sähköä kuluu rivitalossa? <https://www.lumme-energia.fi/blogi/kuinka-paljon-sahkoa-kuluu-rivitalossa/>

Motiva. (2.5.2025a). Sähkön hankinta ja kulutus. Haettu 12.10.2025 osoitteesta <https://www.motiva.fi/ratkaisut/energiankaytto-suomessa/sahkon-hankinta-ja-kulutus>

Motiva. (5.5.2025b). Kotitaloudet – energian loppukäyttö. Haettu 13.10.2025 osoitteesta <https://www.motiva.fi/ratkaisut/energiankaytto-suomessa/energian-loppukaytto/kotitaloudet>

Motiva. (28.2.2025c). Sähköautot. Haettu 24.10.2025 osoitteesta <https://www.motiva.fi/ratkaisut/kestava-liikenne-ja-liikkuminen/valitse-auto-viisaasti/ajoneuvotekniikka/moottoritekniikka/sahkoautot>

Motiva. (26.11.2025d). Kulutusjousto – näin hyödynnät sähkön hintavaihtelut kotonasi. Haettu 18.12.2025 osoitteesta <https://www.motiva.fi/koti-ja-asuminen/sahkon-kulutusjousto>

Motiva. (3.3.2025e). Sähköauton lataustekniikka ja turvallisuus. Haettu 11.1.2026 osoitteesta <https://www.motiva.fi/ratkaisut/kestava-liikenne-ja-liikkuminen/valitse-auto-viisaasti/autotyyppi/sahkoauton-lataustekniikka-ja-turvallisuus>

Motiva. (n.d.). Sähköauton energiafiksu lataus omakotitalossa [esite]. Haettu 11.1.2026 osoitteesta <https://www.motiva.fi/files/20876/Sahkoauton-energiafiksu-lataus-omakotitalossa.pdf>

Node-RED. (n.d.). Node-RED Library (Flow Library). Haettu 11.1.2026 osoitteesta <https://flows.nodered.org/>

Nord Pool. (1.11.2024). Successful go-live of the Nordic Flow-based Market Coupling project. Haettu 28.9.2025 osoitteesta <https://urly.fi/41VI>

Nord Pool, (12.9.2025). Market Coupling Steering Committee confirms go-live of 15-Minute MTU in SDAC on trading day 30 September 2025 for delivery day 1 October 2025. <https://urly.fi/41Vm>

Nord Pool. (n.d.-a). Nordic Flow-Based Day-Ahead Market Coupling – go-live. Haettu 28.9.2025 osoitteesta <https://www.nordpoolgroup.com/en/trading/nordic-flow-based-day-ahead-market-coupling/>

Nord Pool. (n.d.-b). Day-ahead market. Haettu 28.9.2025 osoitteesta <https://www.nordpoolgroup.com/en/the-power-market/Day-ahead-market/>

Nord Pool. (n.d.-c). Intraday market. Haettu 4.1.2026 osoitteesta <https://www.nordpoolgroup.com/en/the-power-market/Intraday-market/>

Nord Pool. (n.d.-d). Capacities. Haettu 4.1.2026 osoitteesta <https://www.nordpoolgroup.com/en/trading/capacities/>

Nord Pool. (n.d.-e). How is the electricity price calculated? Haettu 4.1.2026 osoitteesta <https://www.nordpoolgroup.com/en/the-power-market/how-is-the-electricity-price-calculated/>

Novak, T. (2008). Functional Safety and System Security in Building Automation and Control Systems: A Common Approach (Doctoral dissertation, Vienna University of Technology). <https://urly.fi/41Vn>

OnOffer. (n.d.). OnOffer.io sivusto. Haettu 18.12.2025 osoitteesta <https://onoffer.io/>

Oomi. (n.d.). Kysely: Suomalaiset jakautuvat sähkökäytössä kahteen leiriin – toiset haluavat vaivattomuutta, toiset optimoivat säästöjä. Haettu 30.12.2025 osoitteesta <https://oomi.fi/oomi/uutiset/kysely-suomalaiset-jakautuvat-sahkonkaytossa-kahteen-leiriin/>

openHAB. (n.d.). Add-ons. Haettu 11.1.2026 osoitteesta <https://www.openhab.org/addons/>

Sarran, L., Gunay, H. B., O'Brien, W., Hviid, C. A. & Rode, C. (2021). A data-driven study of thermostat overrides during demand response events. Energy Policy, 153, 112290. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2021.112290>

Satakunnan ammattikorkeakoulu. (n.d.). Tietoturva ja tietosuoja. Haettu 1.11.2025 osoitteesta <https://www.samk.fi/samk/turvallisuus/tietoturva-ja-tietosuoja/>

Sähkömarkkinalaki 588/2013. <http://data.finlex.fi/eli/sd/2013/588/ajantasa/2025-12-22/fin>

Sähkövertaaja.fi. (n.d.). Keskimääräinen sähkönkulutus. Haettu 18.10.2025 osoitteesta <https://sahkovertaaja.fi/keskimaarainen-sahkonkulutus/>

Tasmota. (n.d.). Templates (documentation). Haettu 11.1.2026 osoitteesta <https://tasmota.github.io/docs/Templates/>

Thermia. (2020). Asennusopas, Laajennusmoduuli 3 (EM3) Thermia Atlas ja Calibra).

Tilastokeskus. (2.9.2024). Kotitalouksien sähkönkulutus on laskussa – lisälämmönlähteillä aiempaa suurempi merkitys pientalojen lämmityksessä. <https://stat.fi/fi/uutinen/kotitalouksien-sahkonkulutus-on-laskussa-lisalammonlahteilla-aiempaa-suurempi-merkitys-pientalojen-lammityksessa>

Tilastokeskus. (15.4.2025a). Suomen sähkön tuotannosta 95 % perustui fossiilittomaan energiaan vuonna 2024. <https://stat.fi/julkaisu/cm1kktw8ualm207vwnzpsmpc8>

Tilastokeskus. (3.3.2025b). Suomen ajoneuvokanta kasvoi vuonna 2024. <https://stat.fi/julkaisu/cm10kulpe8nbj07w0fh2g6kbp>

Tilastokeskus. (15.4.2025c). Vuonna 2024 autoilla ajettiin saman verran kuin vuotta aiemmin. <https://stat.fi/julkaisu/cm10n2yky9feu07w0s0c567v0>

Tilastokeskus. (28.5.2025d). 116a -- Asuntokunnat koon ja talotyypin mukaan, 1985–2024 [tilasto]. StatFin. Haettu 5.1.2026 osoitteesta https://pxdata.stat.fi/PxWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin_asas/stat-fin_asas_pxt_116a.px/

Tilastokeskus. (8.5.2025e). 116j -- Kesämökit alueittain, 1970–2024 [tilasto]. StatFin. Haettu 5.1.2026 osoitteesta https://pxweb2.stat.fi/PxWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin_rakke/stat-fin_rakke_pxt_116j.px/

Tilastokeskus. (16.12.2025f). Sähkön kulutus sektoreittain, 1960–2024 (12vm) [tilasto]. StatFin. Haettu 5.1.2026 osoitteesta https://pxdata.stat.fi/PxWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin_ehk/stat-fin_ehk_pxt_12vm.px

Tilastokeskus. (n.d.-a). Asumisen energiankulutus – käsitteet. Haettu 13.10.2025 osoitteesta https://stat.fi/meta/kas/asumisen_energi.html

Tilastokeskus. (n.d.-b). Lämmitystarveluku / astepäiväluku. Haettu 13.10.2025 osoitteesta <https://stat.fi/meta/kas/lammitystarvelu.html>

Turku Energia. (26.5.2025). Paljonko on normaali sähkölasku kuukaudessa? <https://www.turkuenergia.fi/valopilkku/paljonko-on-normaali-sahkolasku-kuukaudessa>

Turku Energia. (n.d.). Kodin laitteiden sähkönkulutus. Haettu 24.10.2025 osoitteesta <https://www.turkuenergia.fi/kotitaloudet/energiansaastovinkit/kodin-laitteiden-sahkonkulutus>

Vaasan Sähkö. (9.1.2025a). Kesämökin sähkönkulutus – mistä se koostuu? <https://www.vaasansahko.fi/energianeuvonta/kesamokin-sahkonkulutus-mista-se-koostuu/>

Vaasan Sähkö. (15.1.2025b). Kodin sähkönkulutus – mistä se muodostuu? <https://www.vaasansahko.fi/energianeuvonta/kodin-sahkonkulutus-mista-se-muodostuu/>

Verohallinto. (n.d.). Sähkön, maakaasun, biokaasun, polttoturpeen, kivihiilen ja mäntyöljyn verotaulukot. Haettu 30.12.2025 osoitteesta <https://www.vero.fi/yritykset-ja-yhteisot/verot-ja-maksut/valmisteverotus/sahkovero/verotaulukot/>

VertaaEnsin.fi. (n.d.). Sähkön kulutuksen arviointilaskuri. Haettu 18.10.2025 osoitteesta <https://www.vertaaensin.fi/sahko/sahkonkulutus-laskuri/>

Wang, F., Fan, X.-W., Zheng, H.-F., Xu, D. & Zhang, X.-P. (2013). Experimental Investigation on Optimal Temperature Lift of an Inverter Heat Pump System. *Thermal Science*, 17(5), 1459–1465.
<https://doi.org/10.2298/TSC11305459W>

Zigbee2MQTT. (n.d.). Supported devices. Haettu 11.1.2026 osoitteesta <https://www.zigbee2mqtt.io/supported-devices/>

Taulukko 21. Alaluokittain konsolidoitu asuntojen sähkölaskutus arvio

Asuntotyyppi	Alaluokka	Lämmitystapa	Lähteitä	Alin_min_kWh	Ylin_max_kWh	Keskiarvo_est_kWh
Kerrostalo	1 hlö	KL (taloyhtiö)	1	1500	1500	1500
Kerrostalo	2 hlö	KL (taloyhtiö)	2	2000	3000	2500
Kerrostalo	Kaksio	KL (taloyhtiö)	2	2000	3000	2270
Kerrostalo	Kaksio (50 m ² , 2 hlö)	KL (taloyhtiö)	1	1200	1800	1500
Kerrostalo	Kolmio	KL (taloyhtiö)	2	2520	4000	3040
Kerrostalo	Kolmio (75 m ² , 2 hlö)	KL (taloyhtiö)	1	1440	2160	1800
Kerrostalo	Yksiö	KL (taloyhtiö)	3	1440	2500	1667
Kerrostalo	Yksiö (30 m ² , 1 hlö)	KL (taloyhtiö)	1	960	1440	1200
Omakotitalo	100 m ² , 4 hlö	Kaukolämpö	1	4500	6000	5250
Omakotitalo	100 m ² , 4 hlö	Kaukolämpö (ei sähkölämmitystä)	1	5000	5000	5000
Omakotitalo	100 m ² , 4 hlö	Suora sähkölämmitys	1	18000	20400	19200
Omakotitalo	100 m ² , 4 hlö	Sähkölämmitys	1	20000	20000	20000
Omakotitalo	120 m ² , 4 hlö	Kaukolämpö	1	7320	7320	7320
Omakotitalo	120 m ² , 4 hlö	Suora sähkölämmitys	1	19200	19200	19200
Omakotitalo	150 m ² , 4 hlö	Kaukolämpö	1	5800	7200	6500
Omakotitalo	150 m ² , 4 hlö	Suora sähkölämmitys	1	24000	26400	25200
Omakotitalo	4 hlö	Muu kuin sähkö (esim. KL)	1	5000	5000	5000
Omakotitalo	4 hlö	Sähkölämmitys	1	19000	19000	19000
Omakotitalo	Sähkölämmitys	Sähkölämmitys	1	19000	19000	19000
Omakotitalo	Sähkölämmitys, Etelä-Suomi	Sähkölämmitys	1	14740	14740	14740
Omakotitalo	Sähkölämmitys, Pohjois-Suomi	Sähkölämmitys	1	24850	24850	24850
Omakotitalo	—	Suora sähkölämmitys	1	10000		10000
Rivitalo	100 m ² , 4 hlö	Kaukolämpö	1	4200	5400	4800
Rivitalo	100 m ² , 4 hlö	Suora sähkölämmitys	1	19200	21600	20400
Rivitalo	2 hlö	Kaukolämpö/MLP (ei sähköä)	1	3000	4000	3500
Rivitalo	3 hlö	Muu kuin sähkö (esim. KL)	1	4000	4000	4000
Rivitalo	70 m ² , 2 hlö	Kaukolämpö	1	2160	3360	2760
Rivitalo	70 m ² , 2 hlö	Suora sähkölämmitys	1	15600	18000	16800
Rivitalo	Kaksio	KL/MLP (taloyhtiö)	1	2700	2700	2700
Rivitalo	Kaukolämpö	KL	1	5000	5000	5000
Rivitalo	Kolmio	KL	1	3000	4000	3500
Rivitalo	Kolmio	KL/MLP (taloyhtiö)	1	3180	3300	3240
Rivitalo	Kolmio	Sähkölämmitys	1	12000	12000	12000
Rivitalo	Pieni	KL	1	2000	3000	2500
Rivitalo	Pieni	Sähkölämmitys	1		8000	
Rivitalo	Suuri ~100 m ² perheasunto	KL	1	5000	5000	5000
Rivitalo	Suuri ~100 m ² perheasunto	Sähkölämmitys	1		20000	
Rivitalo	Sähkölämmitys, Etelä-Suomi	Sähkölämmitys	1	10250	10250	10250
Rivitalo	Sähkölämmitys, Pohjois-Suomi	Sähkölämmitys	1	17305	17305	17305
Rivitalo	—	Suora sähkölämmitys	1	10000	12000	11000
Rivitalo	—	Sähkölämmitys	1	12000	12000	12000
Vapaa-ajan asunto	Mökki (vaihteluväli)	—	1	2000	15000	8500
Vapaa-ajan asunto	Mökki (yleisarvio)	—	1	2000	15000	8500

LIITE 2 (KYSELYTUTKIMUKSEN KYSYMYKSET JA SAATE- TEKSTI):

Saateteksti

Kyselyn tarkoitus on selvittää, miten suomalaiset kotitaloudet ajoittavat ja optimoivat sähkökäyttöään, mitä välineitä ja ratkaisuja siihen käytetään sekä koetaanko optimointi kuormittavana.

Tässä kyselyssä sähkönkulutuksen säädöllä tarkoitetaan kaikkia tapoja, joilla kotitalous vaikuttaa siihen, milloin ja miten paljon sähköä käytetään. Näitä ovat esimerkiksi kodinkoneiden ja laitteiden ajastaminen, sähköauton latauksen ohjaaminen, sähkölämmityksen tehostaminen tai korvaaminen muulla lämmityksellä, sisälämpötilan ja käyttöveden lämpötilan säätäminen sekä erilaisten automaatio- ja ohjausjärjestelmien hyödyntäminen sähkön hinnan tai olosuhteiden mukaan.

Kysely on täysin anonymi, eikä kerää henkilötietoja. Vastaaminen kestää arviolta noin 5 minuuttia, ja tulokset raportoidaan ryhmitasolla osana Satakunnan ammattikorkeakoulussa (SAMK) tehtävää sähkö- ja automaatiotekniikan opinnäytetyötä.

Pyydämme, ettet kirjoita vastauksiin nimiä, osoitteita tai muita yksilöiviä tietoja. Vastaukset tallennetaan SAMKin E-lomake-palveluun, ja niitä käytetään ainoastaan tämän opinnäytetyön toteuttamiseen. Raakadataa säilytetään enintään 31.3.2026 saakka, jonka jälkeen se poistetaan.

Tietojen käsittelyssä ja säilytyksessä noudatetaan Satakunnan ammattikorkeakoulun tietoturva- ja tietosuojaohteita.

Tietoturva ja tietosuoja - SAMK – Satakunnan ammattikorkeakoulu

Jatkamalla hyväksyt, että vastauksesi käsitellään anonymisti tutkimustarkoituksessa. Kiitos avustasi!

Lisätietoja: Juha Mujunen, juha.mujunen@student.samk.fi.

Perustiedot

1. Teetkö aktiivista sähkökäytön optimointia/ajastusta?

Vastaustyyppi: yksi valinta

- Kyllä
- En

2. Roolisi kotitalouden sähköasioissa

Vastaustyyppi: yksi valinta

- Päävastuu
- Osallistun päätöksiin
- En osallistu

3. Sähkö Sopimustyyppi

Vastaustyyppi: yksi valinta

- Pörssisähkö
- Kiinteä
- Joustosopimus / hybridi / spot-vaikutteinen kiinteä
- En tiedä

4. Asumismuoto

Vastaustyyppi: yksi valinta

- Omakotitalo
- Rivitalo
- Kerrostalo
- Paritalo
- Maatila / muu pientalo
- Muu, mikä? (avoin tekstikenttä)

5. Asumuksen pinta-ala

Vastaustyyppi: yksi valinta

- Alle 30 m²
- 30-59 m²
- 60-99 m²
- 100-149 m²
- 150-199 m²
- 200 m² tai enemmän
- En halua sanoa

6. Sähkön kulutus vuodessa, kWh?

Vastaustyyppi: avoin kenttä

- Ohjeteksti: "Arvio riittää, esim. edellisen vuoden laskun perusteella."

7. Pääasiallinen lämmitysmuoto

Vastaustyyppi: yksi valinta

- Kaukolämpö
- Maalämpö
- Ilma-vesilämpöpumppu

- Suora sähkö (patterit/lattia)
- Varaaja/sähkökattila
- Ilmalämpöpumppu + suora sähkö
- Öljy/kaasulämmitys
- Muu, mikä? (avoin tekstikenttä)

Optimointi

8. Hyödynnätkö toissijaista lämmitystä hinnan perusteella?

Vastaustyyppi: yksi valinta (jos useita, valitse eniten hyödynnetty)

- Puulämmitys (takka, leivinuuni, keskuslämmitys)
- Öljy/kaasu
- En hyödynnä toissijaista lämmitystä
- Muu, mikä? (avoin tekstikenttä)

9. Mihin kohteisiin ajoitat tai ohjaat kulutusta?

Vastaustyyppi: monivalinta (valitse kaikki sopivat)

- EV-lataus
- Käyttövesi
- Pääasiallinen lämmitys (esim. lattialämmitys, sähkökattila, maalämpö)
- Ilmalämpöpumppu
- Sauna
- Pyykki/astianpesu
- Akusto
- En optimoi
- Muu, mikä? (avoin tekstikenttä)

10. Jos käytät ohjelmoitavaa relettä/ohjainlaitetta, mitä?

Vastaustyyppi: monivalinta (valitse kaikki sopivat)

- Shelly
- Sonoff
- Aqara/Tuya/Tapo tms.
- Schneider/Qubino
- Siemens Logo! tms.
- Beckhoff
- Raspberry Pi
- Arduino/ESP32/DIY
- Muu PLC
- En tiedä
- Muu, mikä? (avoin tekstikenttä)

11. Millä alustalla/järjestelmällä ohjaus tehdään?

Vastaustyyppi: monivalinta (valitse kaikki sopivat)

- Valmistajan oma sovellus
- Home Assistant
- Node-RED
- OpenHAB/Homey
- Google/Alexa/Apple Home
- Loxone/KNX
- PLC (LOGO!/Beckhoff)
- Energiayhtiön palvelu
- Muu kolmannen osapuolen palvelu
- En tiedä
- Muu, mikä? (avoin tekstikenttä)

12. Mikä ohjauslogiikka/palvelu on käytössä?

Vastaustyyppi: monivalinta (valitse kaikki sopivat)

- Halvimmat X h/vrk
- Hintaraja (€/kWh)
- Yö/päivä
- Ennuste-/sääriippuva
- Oma algoritmi
- Energiayhtiön palvelu
- Muu 3. osapuolen palvelu
- Laitteen valmistajan automatiikka
- En tiedä
- Muu, mikä? (avoin tekstikenttä)

13. Ohjauksen automaatiotaso

Vastaustyyppi: yksi valinta

- Täysin automaattinen
- Osin automaattinen + satunnaisia käsisäätöjä
- Lähinnä manuaalinen
- Ei ohjausta
- En tiedä

14. Kuinka luotettavaksi koet ratkaisusi?

Vastaustyyppi: yksi valinta

- Erittäin epäluotettava
- Melko epäluotettava
- Kohtalaisen luotettava
- Melko luotettava
- Erittäin luotettava
- En osaa sanoa

15. Kodinkoneiden ajastus – miten toteutat?

Vastaustyyppi: monivalinta (valitse kaikki sopivat)

- Laitteen oma ajastin
- Älypistoke/rele
- Kotiautomaatio
- Energiayhtiön palvelu
- En ajasta kodinkoneita
- Muu, mikä? (avoin tekstikenttä)

16. Käytetty aika pörssihintojen seurantaan ja säätöihin / vrk (viimeisen 12 kk aikana keskimäärin)

Vastaustyyppi: yksi valinta

- 0 min
- 1-5 min
- 6-10 min
- 11-30 min
- 31-60 min
- Yli 60 min
- En osaa sanoa

17. Koetko optimoinnin kuormittavaksi? (viimeisen 12 kk aikana)

Vastaustyyppi: yksi valinta

- Ei lainkaan kuormittavaa
- Vähän kuormittavaa
- Jonkin verran kuormittavaa
- Melko kuormittavaa
- Erittäin kuormittavaa
- En osaa sanoa

18. Vaikutus asumismukavuuteen

Vastaustyyppi: monivalinta (valitse kaikki sopivat)

- Ei vaikutusta
- Parantunut kustannusten hallinta
- Sisälämpötilan suurempi vaihtelu
- Lämmin vesi välillä riittämätön
- Saunomisen/ruoanlaiton ajoitus rajoittaa
- Melu yöaikaan (laitteet)
- Laitteiden käyttöikkunat rajoittavat arkea
- En osaa sanoa
- Muu, mikä? (avoin tekstikenttä)

19. Arvio säästöistä (€/kk)

Vastaustyyppi: yksi valinta

- 0 €
- 1-10 €
- 11-30 €
- 31-60 €
- 61-100 €
- 101-200 €
- Yli 200 €

20. Jos kiinteä hinta olisi sama kuin viimeisen 12 kk pörssisähkön OMALLA KÄYTÖLLÄSI painotettu keskiarvo, valitsisitko kiinteän ja luopuisitko optimoinnista?

Vastaustyyppi: yksi valinta

- Valitsisin kiinteän ja lopettaisin/keventäisin optimointia
- Valitsisin kiinteän, mutta jatkaisin osaa optimoinneista
- Jäisin pörssiin ja jatkaisin optimointia
- En osaa sanoa

21. Mitkä syyt motivoivat optimoimaan?

Vastaustyyppi: monivalinta (valitse kaikki sopivat)

- Rahansäästö
- Ympäristö / oman sähkönkulutuksen vähentäminen
- Mahdollisuus hyödyntää omaa aurinkosähköä paremmin
- Mielenkiinto / harrastus / tekninen kokeilunhalu
- Automaation tuoma mukavuus ("toimii taustalla")
- Varautuminen / omavaraisuus / häiriötilanteisiin valmistautuminen
- Hinnan vaihtelun aiheuttaman epävarmuuden vähentäminen
- Haluan tukea sähköjärjestelmän tasapainoa / huippukuormien leikkausta
- En osaa sanoa
- Muu, mikä? (avoin tekstikenttä)

En optimoi

22. Jos et optimoi aktiivisesti: suurimmat esteet

Vastaustyyppi: monivalinta (valitse kaikki sopivat)

- Ajan puute
- Liian monimutkaista
- Laitteiden tai palveluiden kustannus
- Luotettavuus
- Tietosuoja/kyberturva

- Asumismukavuus
- Ei mahdollista (taloyhtiö / tekniikka / vuokra-asuminen)
- En näe taloudellista hyötyä
- En halua
- Muu syy, mikä? (avoin tekstikenttä)