



Osaamista  
ja oivallusta  
tulevaisuuden  
tekemiseen

Tämä on rinnakkaistallenne. Rinnakkaistallenteen sivuasettelut ja typografiset yksityiskohdat saattavat poiketa alkuperäisestä julkaisusta.

**Käytä viittauksessa alkuperäistä lähdettä:**

Linja-aho, V. (2021). Hyötysuhde ratkaisee pelin. *Suomen autolehti*, 10, s. 40-44.

Energiaa auton liikuttamiseen

# Hyötysuhde ratkaisee pelin

Sähköauton järkevyyttä liikenteen päästöjen vähentäjänä kiteytyy itse auton erinomaiseen hyötysuhteeseen. Kokonaisuuden taloudellisuuteen ja ekologisuuteen vaikuttaa se, miten sähkö on tuotettu.

■ DI Vesa Linja-aho, sähkötekniikan konsultti, opettaja ja tietokirjailija

Kannettavan kuluttajaelektronikan säilyttämällä akkutekniikan kehitys teki täyssähköautot yli-

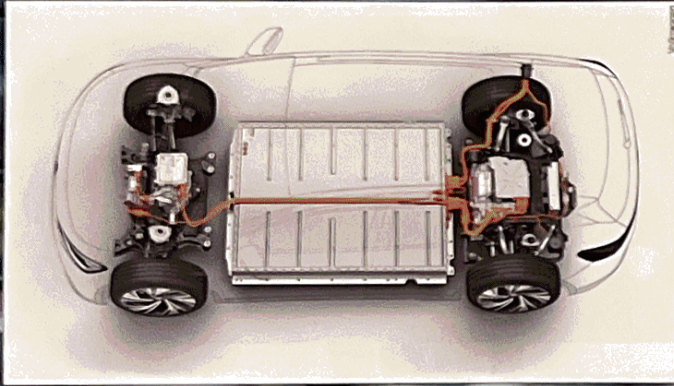
päättää mahdolliseksi tekniikkaksi noin vuosikymmen sitten. Täyssähköautot jäisivät muuten tekniseksi

kuriotteiksi, mutta niillä on muuhin käyttövoimiin verrattuna yksi ylivoimainen asia: kokonaishyötysuhde. Polttomoottoriautoon syötystä energiasta tyypillisesti vain alle 20 % saadaan liikuttamaan autoa, mutta sähköautossa tämä luku on yli 50 %.

Myös sähkönsiirto on helppoa pienihäviöisesti: siirtohäviöt riippuvat valtion sähköverkon kunnosta ja

koosta. Pitkien välimatkojen Suomessa verkko on hyväkuntoinen, ja siirtohäviöt ovat vain muutama prosentti.

Polttomoottoriautoa ja sähköautoa verrattaessa tulee ymmärtää nimenomaan kokonaishyötysuhde. Polttomoottoriin perustuvan auton voimalinjan hyötysuhde on huono ja sähköisen voimalinjan hyötysuhde on hyvä. Kokonaisuuteen vaikut-



Auton sähköisen voimalinjan hyötysuhde on hyvä, vaikka mukaan lasketaan koko ketju: laurista akun ja muuttajan kautta moottoriin.



taa kuitenkin myös sähkön tuotantotapa: fossiilista polttoaineista voi tehdä sähköä hyvin monenlaisella hyötysuhteella.

Sähköauto kuluttaa sähköä maantiejossa noin 20 kWh/100 km. Litrassa bensiiniä on 8,9 kWh energiaa. Viiden litran kulutuksella energiaa siis kuluu 45 kWh. Oliko taloudellisempaa polttaa polttoainevoimalassa, riippuu voimalan hyötysuhteesta.

## Hyötysuhde voimalassa

Perinteiset sähköntuotantotavat kerustuvat siihen, että poltetaan kivhiiltä, maakaasua tai öljyä. Syntyvällä lämmöllä keitetään vettä, joka höyrystyy ja höyry pyörittää turbiinia. Tällaiseen tekniikkaan perus-

tuvan voimalaitoksen eli lauhdevoimalaitoksen hyötysuhde on tyypillisesti hieman yli 30 %.

Mikäli polttoaine on nestemäistä tai kaasumaista, polttoaineesta saadaan parempi hyöty käyttämällä niin sanottua kombiprosessia: polttoaine poltetaan generaattorin pyörittävässä kaasuturbiinissa, jonka hyötysuhde on suuruusluokaltaan 30–40 %. Tämän lisäksi turbiinin hukkalämpö käytetään höyryturbiinin pyörittämiseen. Näin päästään noin 50–60 % kokonaishyötysuhteeseen sähköntuotannossa.

Mikäli vielä tästä jäävä hukkalämpö hyödynnetään kaukolämpönä, voidaan päästä jopa yli 90 % kokonaishyötysuhteeseen.

Hukkalämmön hyödyntäminen on tuttu tempu henkilöautosakin: talvella moottorin hukkalämpö lämmitää ohjaamo. Sähköautossa pitää turvautua ilmalämpöpumpun tai vastuslämmitykseen, koska hukkalämpöä syntyy vähän.

Nykyaikaisen vesivoimalan hyötysuhde on tyypillisesti 85–90 %, tuulivoimalan 30–50 % ja aurinkopaneelin alle 20 %. Ydinvoimaloissa hukkalämmön hyödyntämiseen liittyy teknis-poliittisia haasteita, joten kokonaishyötysuhde jää tavallisesti tavallisen lauhdevoimalan tapaan 30 % tuntumaan.

Ydinvoimat sijoitetaan riskienhallintaystävälliseen suurista asutuskeskuksista, jolloin pitkä siirtomatka tekee hukkalämmön hyödyntämisestä kaukolämpönä kallista. Lisäksi ydinreaktorin tuottama lämpö on merkittävästi palamiseen perustuvia voimaloita pienempi, mikä vaikeuttaa lämmön jatko-hyödyntämistä. Faktapohjaisen riskienhallinnan lisäksi ydinvoimalan tuotosten hyödyntämiseen liittyy mielikuvahaittoja säteilystä, mikä voi tehdä hankkeen poliittisesti hankalaksi ajettavaksi.

## Myös sähkön siirrossa ja jakelussa häviöitä

Sähkön siirtöhäviöt kantaverkossa ovat noin 1,5 % ja jakeliverkoissa noin 3 % luokkaa. Tiivissä kaupungeissa häviöt ovat pienemmät kuin pitkillä matkoilla haja-asutusalueilla.

Yhdysvalloissa maan energiaviraston mukaan siirto- ja jakeluhäviöt ovat noin 5 % luokkaa. Maailmanpankin tilastopalvelun aineiston perusteella voidaan yleistää, että teollisuusmaissa lukema on 5 % suuruusluokkaa ja kehittyvissä maissa 10 % tai enemmän.

Konfliktimaissa lukema voi hoidella useissa kymmenissä prosentteissa. Ammattikielellä häviöt jaetaan teknisiin ja ei-teknisiin häviöihin, joista jälkimmäinen tarkoittaa sähkön varastamista.

## Sähkömoottorissa hyvä hyötysuhde

Sähköautoissa käytettävät sähkömoottorit ovat tyypillisesti kesto- ja magneettitahtimoottoreita tai induktio- ja synkro- moottoreita. Molempien hyötysuhteet ajoneuvokäytössä ovat yli 90 % hyvin laajalla kierros- ja vääntömomentti-alueella. Parhaimmillaan moottorin hyötysuhde voi olla jopa yli 95 prosenttia.

Tarkka arvo riippuu aina ajoneuvomallista, kierrosluvusta ja vääntömomentista. Oheisessa kuvassa nähdään 2010-luvun alun Nissan Leafin hyötysuhdekuvaaja Yhdysvaltojen energiviraston Oak Ridgen kansallislaboratorion mitaamana.

Laajan vääntömomentti-alueen vuoksi sähköautoissa on lähes poikkeuksetta käytetty kiinteävälitys- ja voimansiirto- sähkömoottoria ja alennusvaihdetta tasauspyörästöineen. Toimiva auto on yksinkertaisesti mahdollista rakentaa ilman vaihteistoja, ja näin on tehty: autosta tulee halvempi valmistaa, kun paljon liikkuvia osia jää pois.

Tämä ei tarkoita, etteikö vaihteistosta olisi hyötyä. Etenkin urheiluautoissa suorituskyky paranee, kun moottorin koko kierrosluokalu-keen ei tarvitse kattaa koko auton nopeusluetta. Sarjajalenteista sähköautoista poikkeuksen tekevätkin Porsche Taycan ja Audi e-tron GT, joissa on kaksivaihteinen vaihteisto takapyörien voimansiirrossa. Etupyörien sähkömoottorissa käytetään kiinteävälitys- ja alennusvaihdetta.

Keväällä 2021 Bosch esitteli juuri sähköautoihin suunnitellun

portaattoman CVT4EV-vaihteiston. Sopivissa olosuhteissa vaihteistolla voidaan saavuttaa suuruusluokaltaan 10 % parannus niin huippunopeuteen kuin hyötysuhteeseenkin.

On siis väärin sanoa, että sähköautossa vaihteistosta ei olisi hyötyä. Vaihteisto vain ei ole pakollinen, kuten polttomoottoriautossa. Vaihteiston lisäämisestä on myös kustannuksia, joten hyötyjen ja haittojen punnitseminen jää suunnittelijoiden tehtäväksi.

## Vaihtosähköstä tasasähköksi ja taas takaisin

Sähköauton akku ladataan tavallisesti syöttämällä sähköverkosta vaihtosähköä auton sisäiseen laturiin, joka muuttaa tehoelektronikan avulla vaihtosähkön akulle sopivaksi tasasähköksi. Käytännössä laturi koostuu nopeista mikroprosessorin ohjaamista puolijohdekytkimistä.

Autoa ajettaessa sama tekniikka muuttaa akulta saatavan tasasähkön auton ajomootorille sopivaksi vaihtosähköksi – ja moottorijarrutuksessa taas toisin päin.

Yleensä laturi sekä moottorin ja akun välissä oleva muuttaja (invertteri) ovat kaksi eri moduulia. Moottoria syöttävä muuttaja on toiminnallisen turvallisuuden kannalta erittäin kriittinen osa, toisin kuin laturi. Laturin vika aiheuttaa vain harmia kuljettajalle, mutta moottorinohjaimen hajoaminen kesken ohituslaitteen voi johtaa vakaviin henkilövahinkoihin.

Poikkeus sääntöön on Renault Zoe, jossa yksi ja sama yksikkö huolehtii akun lataamisesta, olipa kyseessä moottorijarrutus tai sähköverkosta syötetty energia.

Tehoelektronikan hyötysuhde on tyypillisesti yli 90 %. Kuinka paljon yli, riippuu suunnitteluratkaisuista ja kuormituksesta. Ennen moottorille pääsemistä sähköverkosta otettua sähköä joutuu kulkemaan kahden tehoelektronikan läpi: ensin akkulatorin ja sitten moottoria syöttävän muuttajan.

Laturin hyötysuhde on parhaimmillaan hieman yli 90 %. Hyötysuhde kuitenkin putoaa, jos la-



tausvirtaa rajoitetaan esimerkiksi sähköverkon syöttökyvyn takia. Tehoelektronikka on optimoitu toimimaan nimellistehollaan (esimerkiksi 3 x 16 A, 11 kW), mutta jos käytössä on vain sukolatausjohto (1 x 8 A, 1,8 kW), hyötysuhde voi laskea lähes 80 %.

Moottoria syöttävän muuttajan tehokkuus riippuu sekin käytöstilasta. Oheisessa kuvassa on esitetty Oak Ridgen kansallislaboratorion mittaus tulokset Nissan Leafin muuttajasta. Parhaimmillaan hyötysuhde on jopa 99 %.

## Akun hyötysuhde laskee iän myötä

Uusien litiumioniakkujen hyötysuhde on hyvin lähellä sataa prosenttia. Akkujen ikääntyessä hyötysuhde laskee. Yli 10-vuotiaan akun hyötysuhde voi pudota 80 % tuntumaan. Tarkat arvot riippuvat käytetystä akkukemialla ja akun kunnosta.

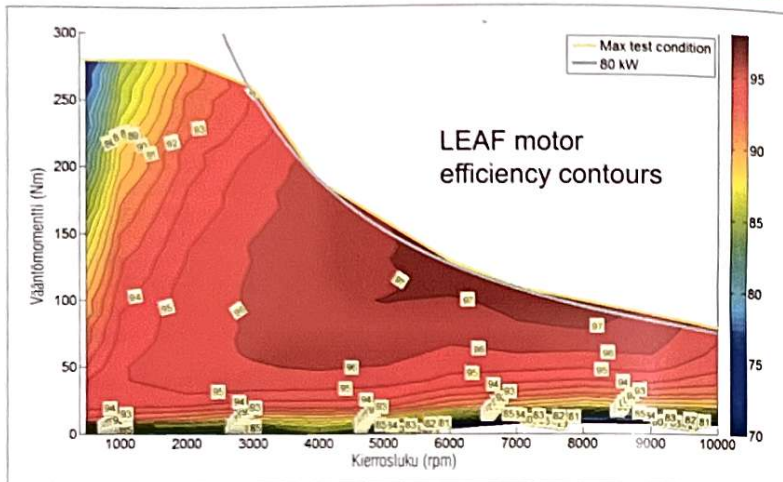
Myös kylmä sää kasvattaa akun sisäisiä häviöitä. Jos autoa säilytetään kylmässä, akkua joudutaan lämmitettämään ladattaessa, mikä kasvattaa koko lataustapahtuman häviöitä.

Sähköauton ja polttomootorin auton punteja tasoittaa etenkin kovalla pakkasella lisäksi se, että ohjaamon lämmitys voidaan polttomootoriautossa hoitaa moottorin hukkalämmöllä. Sähköautossa lämmitysenergia on otettava akulta joko suoraan vastuslämmityksenä tai ilmalämpöpumpun käyttämällä.

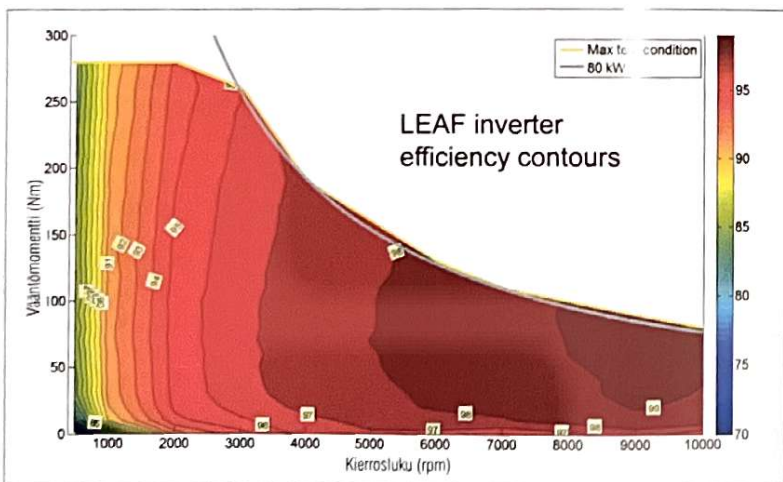
Akun kannalta pikalatauksessa häviöt ovat suuremmat kuin hitaassa tai keskinopeassa latauksessa. Tämä johtuu siitä, että resistiiviset häviöt akassa kasvavat virran neliöön verrattuna. Ero ei ole suuren suuri: jos tavallisen lataamisen hyötysuhde on hieman yli 90 %, pikalatauksessa se on hieman alle 90 %. Tarkat arvot riippuvat jälleen suunnitteluratkaisuista.

## Sähköauton hyötysuhde monen tekijän tulo

Tarkka häviöiden jakautuminen eri lämpötiloissa sekä muissa ajo- ja latausolosuhteissa on asia, josta ei ole käytännössä juuri julkais-



Nissan Leafin kestonagneettitahtimootorin hyötysuhde on erinomainen hyvin laajalla kierrosalueella.



Nissan Leafin muuttajan (invertterin) hyötysuhde on reilusti yli 90 %.

tu kattavia tutkimus- ja mittaus tuloksia. Tyypillisesti on tutkittu kokonaisenergiankulutusta tai jotakin tiettyä osa-aluetta, kuten lataamisen energiankulutusta. Nämäkin pätevät luonnollisesti vain kyseiselle ajoneuvomallille.

Autoilijan näkökulmasta olen- naista on se energiankulutus, joka

menee auton latausportista sisään. Yhdysvaltojen energiaviraston mukaan sähköauton kokonaishyötysuhde on 60–70 %, eli sen verran autoon ladattua energiasta saadaan pyörä pyörittämään. Jos otetaan varovasti laturin, akun, muuttajan ja moottorin hyötysuhteeksi 90 % kullekin, hyötysuhteeksi saa-

daan 66 %, mikä on linjassa edellä mainitun arvon kanssa. Lisäksi muutama prosentti häviää mekaanisessa voimansiirrossa alennusvaihteissa ja taasuyöpörittäessä.

## Hybriditeknikka parantaa polttomootorin hyötysuhdetta

Ennen auton polttoainesäilöön päätymistä raakaöljystä – tai vaikkapa teollisuusjätteistä tai palmuöljystä – valmistettu polttoneste vaatii käsittelyä ja kuljettamista, jolla on

**Jos oletetaan laturin, akun, muuttajan ja moottorin hyötysuhteiksi 90 %, sähköauton kokonaishyötysuhteeksi saadaan 66 %.**

oma energiantarpeensa. Fossiilissa polttonesteissä jalostus, käsittely ja kuljetus tuottavat vielä suuruusluokaltaan 20 % päästöjä itse moottorista syntyvien päästöjen päälle.

Laskentaa ja vertailua vaikeuttaa, että öljystä valmistetaan myös muita tuotteita bitumista muoveihin. Vaikka kaikki kuluttajat päättäisivät lopettaa fossiilisen bensiinin ja dieselin ostamisen huomenna, öljyteollisuus ei häviäisi miinkään.

Jo reilu vuosikymmen ennen täyssähköautojen esimarsssia esiteltiin sarjavalmisteiset hybridautot, joissa polttoaineenkulutus oli saatu puristettua pieneksi sähkökoneen ja polttomoottorin yhteistyöllä. Kun jarrutusenergia ei haaskata lämmöksi jarruissa, se kerätään talteen pieneen akkuihin, kokonaiskulutus pienenee etenkin kaupunkiajossa. Sähkömoottorin käyttö polttomoottorin tukena mahdollistaa, että polttomoottorissa voidaan käyttää Atkinson-työkiertoa. Se parantaa hyötysuhdetta, mutta heikentää alhaisten pyörintänopeuksien vääntö-

## Hyötysuhde verotustakin merkittävämpi

Takavuosina huoltoasemilla näki tarroja, joissa muistutettiin, että 75 % bensiinin hinnasta on veroja. Tällä hetkellä bensiinilitran hintaan lisätään valmistevero (0,7596 e), ja tähän verolliseen hintaan lisätään vielä 24 % arvonlisävero. Jos bensiinilitra maksaa 1,70 e, sen arvonlisäveroton hinta on 1,37 e. Kun tästä vähennetään valmistevero, verottomaksi litrahinnaksi saadaan 1,37 e - 0,7596 e = 0,61 e. Veroa bensiinin 1,70 e litrahinnasta on siis tällä hinnalla  $(1,70 - 0,61) / 1,70 \sim 64\%$ . Koska valmisteveron määrä on kiinteä, nostaa bensiinin markkinahinnan lasku veron osuutta ja päinvastoin.

Paljonko sähkön hinnasta on veroa? Sähkölle on vaikeampi määrittää tavallista hintaa, koska siirtomaksuun vaikuttaa asuinpaikkakunta ja energian hintaan se, milloin autoaan lataa. Yön hiljaisina tunteina pörssisähköä saa hyvinkin edullisesti.

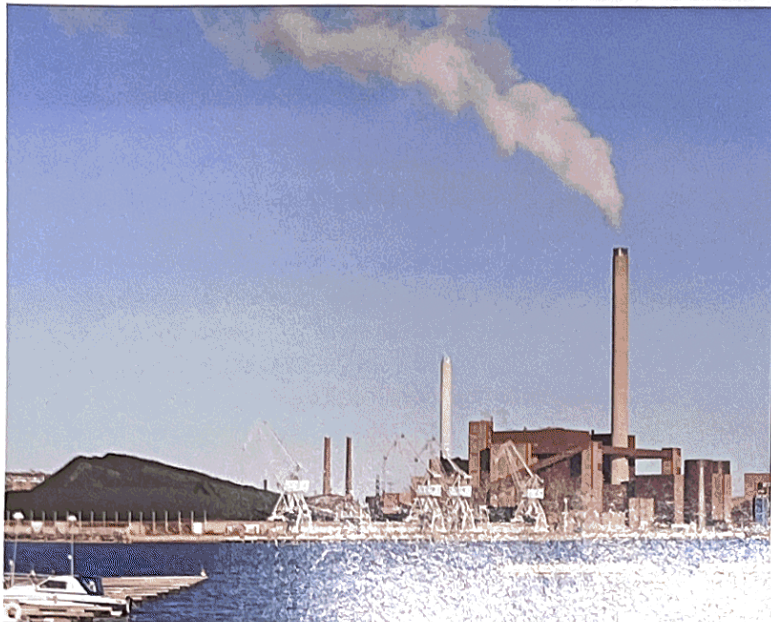
Jos esimerkiksi sähkölämmitteisessä omakotitalossa asuva lataa sähköautonsa yöllä Carunan verkossa, kilowattitunnin siirtomaksu on 2,21 senttiä, yönsähkön energian hinta on 5 senttiä ja sähkövero 2,253 senttiä. Nämä lasketaan yhteen, ja päälle lisätään vielä 24 % arvonlisävero (2,27 senttiä), jolloin kuluttaja maksaa sähköstään 11,73 senttiä. Tällöin sähkön hinnasta veroa on

$(2,253 + 2,27) / 11,73 \sim 39\%$ . Jos autoa lataa päivällä kalliimmalla sähköllä (tai talo ei ole sähkölämmiteinen, jolloin yösiirtosopimus ei kannata), verojen osuus on pienempi.

Mitä sähkö maksaisi, jos sitä verotettaisiin yhtä hanakasti kuin bensiiniä – eli esimerkkinä hinnoilla sähkön hinnasta olisi 64 % veroa? Tämä toteutuu, kun sähkövero on 8,94 senttiä – jolloin yönsähkön kuluttajahinta olisi peräti  $(2,21 + 5 + 8,94) \times 1,24 = 20$  senttiä – päiväsaikaan syksyn pörssisähköhinnoilla jopa yli 30 senttiä.

20 sentin kilowattituntihinnalla 100 kilometrin polttoainekustannukseksi tulee 4 euroa – talvipakkasilla tai moottoritiellä vähän enemmän. Bensiinautolla, joka kuluttaa 5 l/100 km, vastaava kustannus on  $5 \text{ l} \times 1,7 \text{ e/l} = 8,5 \text{ e}$ . Näin ollen myös kovasti verotetulla sähköllä ajaminen olisi halvempaa.

Hyödykkeiden hinnanmuodostus on monimutkainen kokonaisuus, mutta juuri hyvä hyötysuhde mahdollistaa pienen energiankulutuksen ja edulliset polttoainekulut. Kun fossiilinen polttoaine palaa voimalassa, hukkalämmön hyödyntämiseen on täysin erilaiset mahdollisuudet kuin liikkuvassa autossa, jossa hukkalämmöllä voidaan korkeintaan lämmittää talvella ohjaamoa. □



Sähkön käytön ympäristöystävällisyys on yksi tärkeistä kriteereistä, kun valitaan uusi voimala. Onko se pyöriin riippuu paljon siitä, hyödynnetäänkö voimalan hukkalämpö kaukolämpönä vai lauhdutusvesinä.

momenttia. Lisäksi polttomoottori voi olla pienempi.

### Vetypolttokennon hyötysuhde noin 50 prosenttia

Vetypolttokennoauto eli lyhyemmin vetyauto on teknisesti sähköauto, jossa sähkö tuotetaan polttokennolla. Päästönä syntyy puhdasta vettä ja hukkalämpöä.

Vetypolttokennon hyötysuhde on toteutuksesta ja olosuhteista riippuen noin 50 % suuruusluokkaa, joten se häviää akkusähkölle reilusti. Polttokennojärjestelmä riittävän turvallisine vetysäiliöineen tekee autosta käytännössä yhtä raskaan kuin ajoakkukin.

Vedyllä on kuitenkin yksi ylivoimainen ominaisuus: polttoainesäiliön täyttö onnistuu muutamassa minuutissa. Lisäksi vety soveltuu energian varastointiin hyvin: esimerkiksi tuulivoimalla tuotetulla sähköllä voidaan valmistaa halpaa vetyä, kun tuulee paljon, mutta sähkön kysyntä on pientä.

Toisaalta sähköautojen pikalataustehot ovat kasvaneet jo 300 kilowatin suuruusluokkaan, jolloin kymmenen minuutin lataustauko mahdollistaa yli 200 kilometrin ajamisen.

Vedyllä on todennäköisesti paikkansa tulevaisuuden vähäpääs-

toisessa raskaassa liikenteessä – joidenkin visioiden mukaan jopa lentoliikenteessä.

### Rullaus vai moottorijarrutus?

1990-luvulla autokoulussa opetettiin, että polttoaineensuihkutusjärjestelmällä varustetulla autolla taloudellisin tapa hidastaa vauhtia on moottorijarrutus ja perinteisellä kaasutinmoottorilla taas vapaalla rullaaminen.

Voimakasta moottorijarrutusta näkee joskus internetkeskusteluissa käytettävän jopa perusteluna sähköautoja vastaan. Perustelu on huono, koska lähes kaikissa sähköautoissa moottorijarrutuksen voimakkuuden voi säätää mieleisekseen auton asetuksista, joko valikosta tai ohjauspyörän vaihdelätkistä.

Vaikka sähköautossa moottorijarrutus kerää energiaa takaisin akkuun, tulee muistaa, että tässäkin prosessissa syntyy häviöitä: ensin akkua ladattaessa ja sitten taas uudelleen kiihdytettäessä. Taloudellisen ajon kannalta parasta on, jos turha vauhdin hiljentäminen jää kokonaan pois. Aihetta käsitellään laajasti **Markku Iksen** kirjassa *Aja taloudellisesti*, joka on vuodelta 2013, mutta ei tältä osin vanhentunut. Sama fysiikka pätee myös täyssähköautoihin.

### Sähköautokin kertoo kalavaleita

Polttomoottoriautojen kulutusta ruutuvihkoon seuraaville on ollut jo pitkään tuttu ilmiö, että auton ajotietokoneen oma kulutusnäyttö näyttää pienempää kulutusta, kuin mitä autoon tosiasiaa on täytetty polttoainetta.

Sähköautoissa ilmiö toistuu, mutta on ymmärrettävämpi: auton oma kulutusmittari mittaa yleensä akulta otettua energiamäärää eikä välttämättä ota huomioon mitenkään akun sisäisiä tai sen lataamisen tehohäviöitä. Etenkin jos autoa ladataan ja ajetaan kylmässä, sekä lataus- että purkaushäviöt kasvavat.

Lisäksi tulee muistaa, että polttonesteiden ja (lataus)sähkön myynnissä määrät mitataan mittauslaitelain tiukat vaatimukset täytävillä mittareilla. Auton omalle näytölle ei ole vastaavia vaatimuksia.

### Biodieselit voimalaan?

Sähkön tuotanto kombiprosessilla saavuttaa jopa yli 90 % hyötysuhteen, siirtohäviöt ovat muutaman prosentin luokkaa ja itse sähköauton hyötysuhde jopa 70 %. Tämän perusteella voisi ajatella, että biopolttoaineet kannattaisi polttaa voimalassa eikä tankata niitä autoihin ollenkaan. Tämä on kuitenkin vää-

rä ratkaisu: yhä edelleen on paljon liikennesovelluksia, joihin akkusähkö ei sovellu. Nestemäiset biopolttoaineet kannattaa tankata raskaan liikenteen ja lentokoneiden polttoainesäiliöön ja tuottaa sähköä tekniikoilla, joissa ei tarvita polttoprosessia ollenkaan, kuten ydin-, vesi- ja tuulivoimalla.

Ilmastonmuutoksen hillitseminen on yhteispeleä, jota turha vastakkainasettelu pahimmillaan haittaa. Sähköistysratkaisuilla saadaan polttomoottorinkin hyötysuhdetta parannettua, ja eri tekniikoiden kilpaillessa keskenään saadaan kaikista puristettua paras mahdollinen hyöty irti. □

Lähteitä ja lisälukemista:  
Markku Ikonen: *Aja taloudellisesti*. 2013.

Tikka ym.: *Loppuraportti: Sähköautojen latauksen muodostama kuormitus- ja mitoitus-teho erilaisissa toimintaympäristöissä*. 2021.

Tim Burrell: *Benchmarking State-of-the-Art Technologies*. 2013.