LANGATTOMIEN NAPPIKUULOKKEIDEN ELINIKÄTESTAUSMENETELMÄT

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Sähkötekniikan kandidaatintyö

2026

Jesse Eriksson

Tarkastaja(t): Dosentti Tommi Kärkkäinen

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUTin energiajärjestelmien tiedekunta

Sähkötekniikka

Jesse Eriksson

Langattomien nappikuulokkeiden elinikätestausmenetelmät

Sähkötekniikan kandidaatintyö

2026

21 sivua, 00 kuvaa, 02 taulukkoa ja 00 liitettä

Tarkastaja(t): Dosentti Tommi Kärkkäinen

Avainsanat: elektroniikka, elinikätestaus, puettava elektroniikka, luotettavuusfysiikka, elinikätestausmenetelmät, nappikuulokkeet

Tutkimus keskittyy langattomien nappikuulokkeiden elinikätestausmenetelmiin ja arvioi, mikä niistä soveltuu optimaalisimmin kyseisten kuulokkeiden elinikätestaukseen. Tutkimuksen aineisto on laadittu kirjallisuuskatsauksen avulla. Tutkimuksessa tarkastellaan muun elektroniikan elinikätestausmenetelmiä teollisuudessa ja sovelletaan niistä saatuja tuloksia langattomien nappikuulokkeiden elinikätestaukseen. Tutkimuksen perusteella optimaalisin elinikätestausmenetelmä langattomille nappikuulokkeille muodostuu neljän eri elinikätestin yhdistelmästä. Menetelmä koostuu HALT-testistä ja PoF-menetelmistä, AST-testistä, värinän porrasrasitustestistä sekä tarvittaessa HASS-testistä. Testeissä hyödynnetään eri stressintekijöitä. Käytetyt stressintekijät ovat edellä mainitussa järjestyksessä kaikki stressintekijät, hiki, värinä sekä lämpö, kosteus ja värinä yhdessä. Kolme ensimmäistä elinikätestiä toteutetaan kuulokkeiden suunnitteluvaiheessa, kun taas viimeistä sovelletaan tuotantovaiheessa. Elinikätestausmenetelmää voidaan muokata valmistajan tarpeiden ja tavoitteiden mukaisesti. Tässä tutkimuksessa esitetty menetelmä täyttää kuitenkin langattomien nappikuulokkeiden elinikätestaukselle asetetut keskeiset vaatimukset mahdollisimman kustannustehokkaasti, luotettavasti ja tehokkaasti. Lisäksi tulevaisuuden menetelmiä voidaan hyödyntää tämän elinikätestausmenetelmän rinnalla huomioiden niiden hyödyllisyyden, tarpeellisuuden ja kustannukset valmistusresurssien näkökulmasta.

ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

LUT School of Energy Systems

Electrical Engineering

Jesse Eriksson

Lifetime testing methods of wireless earphones

Bachelor's thesis

2026

21 pages, 00 figures, 02 tables and 00 appendices

Examiner(s): Docent Tommi Kärkkäinen

Keywords: electronics, lifetime testing, wearable electronics, physics of failure, lifetime testing methods, earphones

The study focuses on lifetime testing methods for wireless earphones and evaluates which of these methods is the most optimal for testing the lifetime of such devices. The research material was compiled through a literature review. The study examines lifetime testing methods used for other electronic products in industry and applies the findings to the lifetime testing of wireless earphones. Based on the research, the most optimal lifetime testing method for wireless earphones consists of a combination of four different lifetime tests. The method includes HALT test and PoF methods, the AST test, the vibration step stress test, and, when necessary, the HASS test. These tests utilize different stress factors. In the order mentioned above, the applied stress factors are all stress factors, sweat, vibration, and finally heat, humidity, and vibration combined. The first three lifetime tests are conducted during the design phase of the earphones, whereas the final test is applied during the production phase. The lifetime testing method can be modified according to the manufacturer's needs and objectives. However, the method presented in this study fulfills the key requirements for wireless earphones' lifetime testing as cost-effectively, reliably, and efficiently as possible. In addition, future methods may be utilized alongside this lifetime testing method by considering their usefulness, necessity, and costs from the perspective of manufacturing resources.

LYHENNELUETTELO

ADT	nopeutettu hajoamistesti (Accelerated Degradation Test)
AFT	nopeutettu vika-aikamalli (Accelerated Failure Time Model)
ALT	nopeutettu elinikätesti (Accelerated Life Test)
AST	nopeutettu hikoilualtistustesti (Accelerated Sweat Test)
CoxPH	Coxin suhteellisen vaaran malli (Cox Proportional Hazard Model)
ESD	staattinen purkaus (Electrostatic Discharge)
FIT	vikataajuus (Failures In Time)
FLT	teknologian perustavanlaatuinen raja (Fundamental Limit of Technology)
HALT	erittäin nopeutettu elinikätesti (Highly Accelerated Life Test)
HASS	erittäin nopeutettu rasitusseulonta (Highly Accelerated Stress Screening)
HAST	erittäin nopeutettu rasitustesti (Highly Accelerated Stress Test)
KM	Kaplan-Meier –malli (Kaplan-Meier Model)
MH-217	Yhdysvaltojen armeijan standardi elektroniikan elinikätestaukseen (MIL-HDBK-217)
MTTF	keskimääräinen aika vikaantumiseen (Mean Time To Failure)
PoF	luotettavuusfysiikka (Physics of Failure)
TTF	vikaantumisaika (Time To Failure)

Tiivistelmä

Lyhenneluettelo

Ilmoitukset

Sisällysluettelo

ILMOITUKSET

Turnitin

Tämän opinnäytetyön alkuperäisyys on tarkistettu Turnitin – samankaltaisuuden tarkastuspalvelun avulla.

Tekoäly

Tämän opinnäytetyön kirjoittaja, Jesse Eriksson, on käyttänyt seuraavia tekoälytyökaluja opinnäytetyön tekemisessä:

- Työkalun A nimi: ResearchRabbit AI
- Työkalun käytön tarkoitus: Löytää ja kerätä aineistoa työlle.
- Selvitys työkalun käytöstä: Antaa komento työkalulle, joka tällöin etsii tieteellisiä lähteitä liittyen työn kuulokkeiden elinikätestausmenetelmiin.

- Työkalun B nimi: Scopus AI
- Työkalun käytön tarkoitus: Löytää ja kerätä aineistoa työlle.
- Selvitys työkalun käytöstä: Antaa komento työkalulle, joka tällöin etsii tieteellisiä lähteitä liittyen työn kuulokkeiden elinikätestausmenetelmiin.

- Työkalun C nimi: ChatGPT
- Työkalun käytön tarkoitus: Löytää ja kerätä aineistoa työlle, muokata tekstin tyyliä ja oikeinkirjoitusta paremmaksi.
- Selvitys työkalun käytöstä: Antaa komento työkalulle, joka tällöin etsii tieteellisiä lähteitä liittyen työn kuulokkeiden elinikätestausmenetelmiin. Antaa komento työkalulle, joka tällöin muokkaa pelkästään tekstin tyyliä ja oikeinkirjoitusta eikä koske tekstin sisältöön.

Vastuu

Kirjoittaja, Jesse Eriksson, ottaa täyden vastuun tämän opinnäytetyön sisällöstä ja on tarkistanut ja muokannut mahdollisen tekoälytyökalujen käytön myötä syntyneen sisällön.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO 1
1.1. Tutkimuksen aihe ja sen merkitys 1
1.2. Tutkimuksen tavoite, rajaus ja tutkimuskysymykset 1
1.3. Tutkimuksen aiemmat työt 2
1.4. Tutkimuksen rakenne 2
2. MENETELMÄT 3
2.1. Hakupalvelut ja avainsanat 3
2.2. Tulosten muodostaminen aineiston perusteella 3
2.3. Aineiston kuvaus ja luotettavuus 4
3. AINEISTON TEORIA 5
3.1. Vanha teoria ja standardi 5
3.2. Nykypäivän teoria ja standardi 5
4. TULOKSET 8
4.1. Eri elinikätestien vaikutus elinikätestauksessa 8
4.1.1. ALT ja ADT 8
4.1.2. 85/85-ikääntymistesti, HAST ja AST 9
4.1.3. Taivutuskoe, ryppytesti ja porrasrasitustesti 10
4.1.4. HALT ja HASS 10
4.1.5. Yhteenveto 11
4.2. Eri stressintekijöiden vaikutus elinikätestauksessa 11
4.2.1. Lämpö 11
4.2.2. Kosteus 12
4.2.3. Mekaaninen rasitus 12
4.2.4. Stressintekijöiden määrä elinikätesteissä 13
4.2.5. Yhteenveto 14
4.3. Optimaaliset elinikätestausmenetelmät langattomien nappikuulokkeiden elinikätestauksessa 14
4.4. Tulevaisuuden menetelmät elinikätestauksessa 15
5. POHDINTA 17
6. JOHTOPÄÄTÖKSET 18

LÄHTEET 19

1. JOHDANTO

Tässä luvussa käsitellään työn tutkimusaihe, tavoite, rajaus, tutkimuskysymykset, tutkimuksen aiemmat työt ja työn rakenne. Luvun jälkeen lukijalle muodostuu alustava ymmärrys työn aiheesta, mikä helpottaa seuraavien lukujen johdonmukaista tarkastelua.

1.1. Tutkimuksen aihe ja sen merkitys

Nykypäivän langattomien kuulokkeiden markkinakoko oli vuonna 2025 noin 57 miljardia USD, ja sen on ennustettu kasvavan vuoteen 2035 mennessä noin 172,4 miljardiin USD:iin (Singh & Singh 2025). Tämän perusteella voidaan päätellä, että langattomien kuulokkeiden suosio tulee kasvamaan lähivuosina. Tämän vuoksi on tärkeää ylläpitää kyseisten kuulokkeiden luotettavuutta ja kestävyyttä korkealla tasolla myös tulevaisuudessa asiakkaiden ja ympäristön näkökulmasta. Jotta tarpeeton kulutus ei lisääntyisi esimerkiksi tuotteen korjausten seurauksena, mahdolliset vikaantumiset tulisi ennaltaehkäistä jo kuulokkeiden suunnitteluvaiheessa.

Tämä työ käsittelee erilaisia elinikätestausmenetelmiä elektroniikan testauksessa ja niiden soveltuvuutta eri tuotteille. Tutkimuksen kohteeksi on valittu langattomat nappikuulokkeet sekä niille optimaaliset elinikätestausmenetelmät. Tuotteen luotettavuus on nykyään merkittävä tekijä monille yrityksille, sillä se vaikuttaa tuotteen markkinoitavuuteen ja tuotekehitysprosessin tehokkuuteen (Hicks & Pierpoint 2009, 385). Samalla resurssien kulutuksen kasvaessa on tärkeää varmistaa tuotteen toimivuus ja ehkäistä vikaantumisia, jotta ympäristön kuormitus pysyisi mahdollisimman vähäisenä. Tämän vuoksi oikeiden elinikätestausmenetelmien valinta on tärkeää tuotteen kestävyyden ja käyttöiän arvioimiseksi sekä luotettavan lopputuotteen takaamiseksi asiakkaalle.

Langattomien nappikuulokkeiden tapauksessa ympäristön aiheuttamat stressintekijät, kuten lämpö ja kosteus, heikentävät materiaalien ja sidosten lujuutta, mikä lopulta lyhentää elektronisten systeemien elinikää. Siksi tuotteen empiiristen rajojen testaaminen potentiaalisten heikkouksien tunnistamiseksi tulee olemaan yhä ajankohtaisempaa tulevaisuuden elektroniikan materiaaleissa ja tuotantoteknologioissa. (Gray & Parschkewitz 2016, 182–183.)

1.2. Tutkimuksen tavoite, rajaus ja tutkimuskysymykset

Työn tavoitteena on tutkia ja kirjoittaa kirjallisuustutkimuksena eri elinikätestausmenetelmistä elektroniikan suunnittelussa sekä arvioida, mikä elinikätestausmenetelmistä soveltuu parhaiten langattomien nappikuulokkeiden käyttöiän määrittämiseen samalla huomioiden niiden kenttänsä olosuhteet. Tässä työssä käyttöikä tarkoittaa sitä ajanjaksoa, jonka aikana kuulokkeet toimivat ilman vikaantumisia, jotka johtaisivat niiden vikaantumismoodeihin. Vikaantumismoodit voivat ilmetä esimerkiksi siten, että kuulokkeita ei enää voida ladata, niiden ääni pätkii tai ne lakkaavat toimimasta kokonaan. Kentällä tarkoitetaan tässä tutkimuksessa käyttäjän käyttöympäristöä ja sen olosuhteita silloin, kun kuulokkeet ovat käyttäjän käytössä.

Työn tutkimuskysymykset ovat seuraavat:

- Miten vikaantuminen määritellään elinikätestauksessa?
- Millaisia elinikätestausmenetelmiä elektroniikassa käytetään vikaantumisajan arviointiin?
- Miten eri elinikätestausmenetelmien vahvuudet ja rajoitteet ilmenevät langattomien nappikuulokkeiden vikaantumisajan arvioinnissa ja miksi?

Tutkimuksen aikana pyritään vastaamaan näihin kysymyksiin ja muodostamaan kokonaiskuva elektroniikan elinikätestausmenetelmistä sekä niiden soveltuvuudesta työn kohteena oleville kuulokkeille.

1.3. Tutkimuksen aiemmat työt

Aiemmat tutkimukset, jotka käsittelisivät suoraan langattomien nappikuulokkeiden elinikätestausta, ovat vähäisiä. Sen sijaan erilaisia elektroniikkatuotteiden elinikätestausta käsitteleviä tutkimuksia on huomattavasti enemmän saatavilla, ja niitä on hyödynnetty tämän tutkimuksen laatimisessa. Tutkimuksen tarkoituksena on luoda pohjaa tuleville tutkimuksille ja projekteille, jotka käsittelevät langattomien nappikuulokkeiden elinikätestausta. Tästä syystä tutkimuksen tekeminen on tärkeää myös tulevaisuuden tutkimustyön näkökulmasta.

1.4. Tutkimuksen rakenne

Työn rakenne noudattaa IMRAD-mallia (Introduction, Methods, Results, And Discussion). Ensimmäisessä luvussa esitellään tutkimuksen tausta, tavoitteet ja tutkimuskysymykset. Toisessa luvussa kuvataan tutkimusmenetelmät ja –metodit sekä aineiston hankinta, hyödyntäminen tulosten muodostamisessa ja analysointi. Kolmannessa luvussa esitetään tutkimuksen tulokset liittyen eri elinikätestausmenetelmiin ja niiden merkitykseen työn kohteena olevien kuulokkeiden kannalta. Tulosten jälkeen pohditaan tutkimusprosessia sekä työn kehittämismahdollisuuksia erityisesti kirjoittamisen ja aineiston keräämisen näkökulmasta. Viimeisessä luvussa kootaan tutkimuksen keskeiset havainnot johtopäätöksiksi, joissa arvioidaan tutkimuksen tavoitteiden saavuttamista sekä mahdollisia jatkotutkimustarpeita.

2. MENETELMÄT

Tässä luvussa esitellään kirjallisuuskatsauksessa käytetyt hakupalvelut, avainsanat sekä aineiston keräämismenetelmät ja tapa, jolla tutkimuksen tulokset on muodostettu aineiston avulla. Lopuksi arvioidaan aineiston luotettavuutta kriittisestä näkökulmasta.

2.1. Hakupalvelut ja avainsanat

Tutkimuksen aineiston hankkimiseen käytettiin useita hakupalveluja. Tässä työssä hyödynnettyjä palveluita olivat LUT Primo, Scopus, Google Scholar, SciSpace ja ResearchRabbit. Näiden palveluiden tietokantoja, kuten IEEE Xplorea ja Web of Sciencea, sovellettiin erilaisten elektroniikan elinikätestausmenetelmiä käsittelevien tieteellisten artikkeleiden ja julkaisujen löytämiseen. Lähteet koottiin yhdeksi lähdeluetteloksi ja hallinnoitiin Zotero-ohjelmiston avulla.

Sopivan aineiston kokoaminen edellytti tarkasti rajattujen avainsanojen käyttöä. Tässä työssä avainsanojen valinnalla oli merkittävä rooli, jotta aiheellisten lähteiden määrä ei vähentyisi liikaa. Tutkimusaihe on laaja, ja siihen liittyviä tutkimuksia löytyy useilta eri aloilta, kuten tehoelektroniikasta lääketieteeseen. Tämän vuoksi tutkimus rajattiin koskemaan elektroniikan alaa. Koska tutkimusaiheesta ei löytynyt riittävästi suomenkielistä aineistoa, kaikki käytetyt lähteet ja avainsanat olivat englanninkielisiä.

Tutkimuksessa käytettyjä avainsanoja olivat muun muassa: *lifetime testing, life testing, electronics, wearable electronics, flexible electronics, reliability, testing methods, HALT, accelerated lifetime testing, ALT, degradation, stress factor, stress level, temperature, humidity, vibration headphones* ja *earphones.*

Näiden avainsanojen erilaisilla yhdistelmillä saatiin muodostettua aineisto tehokkaasti edellä mainittujen hakupalveluiden avulla. Osa lähteistä löytyi muiden tutkimusten lähdeluetteloiden kautta. Työssä hyödynnettiin lisäksi tekoälytyökaluja aineiston kokoamisen tehostamiseksi. Näitä olivat ChatGPT, ResearchRabbit AI ja Scopus AI. Kaksi jälkimmäistä ovat hakupalveluihin integroituja tekoälytyökaluja, jotka auttavat lähteiden rajaamisessa ja etsimisessä. Tekoälytyökaluille syötetyt komennot muodostettiin käyttäen edellä mainittuja avainsanoja. Työkalut ehdottivat tutkimukseen soveltuvia lähteitä ja ilmoittivat tietokannat, joista ne oli löydetty. Tuloksena muodostui lista lähteistä, jotka ovat tutkimuksen kannalta hyödyllisiä.

2.2. Tulosten muodostaminen aineiston perusteella

Tämän työn kannalta aineiston keskeisin tutkimuskohde olivat elektroniikan elinikätestausmenetelmät sekä niihin liittyvien elinikätestien ja stressintekijöiden vaikutukset elektroniikan käyttöikään. Näitä tutkimuksia yhdistelemällä ja analysoimalla muodostettiin tutkimuksen tulokset, jotka liittyvät langattomien nappikuulokkeiden optimaalisiin elinikätestausmenetelmiin. Tässä tutkimuksessa ei tarkasteltu muita elinikätestaukseen liittyviä osa-alueita, kuten elinikämallintamista.

2.3. Aineiston kuvaus ja luotettavuus

Lähes kaikki tutkimuksessa käytetyt lähteet on hankittu aiemmin mainituista hakupalveluista, jotka keskittyvät tieteellisiin julkaisuihin. Suurin osa lähteistä koostuu vertaisarvioiduista tiedeartikkeleista, joiden arviointiin on osallistunut alan tutkijoita ja asiantuntijoita. Lisäksi valtaosa käytetystä aineistosta on julkaistu viimeisen kuuden vuoden aikana, mikä parantaa lähteiden ajankohtaisuutta.

Aineisto kattaa tutkimuksen aihealueen laajasti ja mahdollistaa tutkimuksen tavoitteiden saavuttamisen. Vaikka aineisto ei käsittele suoraan langattomien nappikuulokkeiden elinikätestausmenetelmiä, se kuvaa kattavasti, miten erilaisia elinikätestausmenetelmiä voidaan soveltaa elektroniikan elinikätestauksessa yleisesti. Tämän perusteella lähteitä voidaan pitää riittävän luotettavina tämän tutkimuksen tavoitteiden kannalta sekä nykyaikaisten elinikätestausmenetelmien tarkastelussa langattomien nappikuulokkeiden suunnittelussa.

3. AINEISTON TEORIA

Tässä luvussa selitetään työn aiheeseen liittyviä keskeisiä käsitteitä ja teorioita, jotta tutkimuksen seuraaminen ja ymmärtäminen olisi helpompaa. Aluksi tarkastellaan aikaisempia elinikätestauksen käsitteitä ja teorioita rakentaakseen kontekstia siitä, miten elinikätestausta aiemmin toteutettiin ja mitä sillä pyrittiin selvittämään. Tämän jälkeen käsitellään yleisellä tasolla nykypäivän elektroniikan elinikätestauksessa käytettäviä käsitteitä ja menetelmiä.

3.1. Vanha teoria ja standardi

Aiemmin elektroniikkatuotteiden komponenttien elinikätestauksessa sovellettiin Yhdysvaltain armeijan standardia MIL-HDBK-217 (MH-217) (Denson 1998). Elinikätestaus oli tuolloin pitkäkestoista ja kallista, koska tuotteiden ja komponenttien tehokkaasta elinikätestaamisesta ei ollut vielä riittävästi tietoa. Tämä johtui erityisesti siitä, miten testaus toteutettiin ja mitä elinikätestauksella pyrittiin tutkimaan. Tuolloin keskeisiä käsitteitä olivat FIT (failures in time) ja MTTF (mean time to failure).

FIT kuvaa komponenttien odotettujen vikaantumisten määrää miljardia käyttötuntia kohden (Kobayashi et al. 1978). Käytännössä tällaisen käyttöajan saavuttaminen yksittäisessä testissä olisi mahdotonta, sillä se vastaisi yli 114 000 vuotta. Tämän vuoksi testausaikaa suhteutettiin erilaisilla kertoimilla miljardin käyttötunnin mittakaavaan. Näin voitiin arvioida komponenttien vikaantumismäärää pitkällä aikavälillä. Vikaantumisen määritelmä riippui tarkasteltavasta komponentista.

MTTF:ää sovellettiin FIT-arvon operaatioajan muuttamiseen keskiarvoksi. MTTF kuvaa ei-korjattavien komponenttien tai systeemien keskiarvoa operaatioajalle ennen vikaantumista ja vaihdon tarvetta (Kobayashi et al. 1978). Näiden tietojen avulla valmistajat ja insinöörit pystyivät havaitsemaan muutoksia tuotteiden parametreissa ja ominaisuuksissa ja tekemään rakenteellisia parannuksia tuotteidenn luotettavuuden kehittämiseksi (Farhadi et al. 2023, 50).

Teknologian kehittyessä tuotteiden systeemit muuttuivat huomattavasti aiempaa monimutkaisemmiksi. Tämän seurauksena aikaisemmat elinikätestausmenetelmät eivät enää tuottaneet riittävän luotettavaa tietoa tuotteiden käyttöiästä, koska ne keskittyivät pääasiassa komponenttitason analyysiin systeemitason tarkastelun sijaan. (Denson 1998, SP-323.) MH-217-standardi ei huomioi systeemitason vikaantumisia, joita voivat aiheuttaa esimerkiksi puutteellinen tuotesuunnittelu, valmistusvirheet, virheellinen käsittely tai ympäristöolosuhteet. Tällaisia ympäristötekijöitä ovat esimerkiksi värinä, kosteus ja kytkentävaikutukset. (O'Connor 1983, 11.) Elektroniikan nopea kehitys sekä komponenttien määrän merkittävä kasvu vaikeuttivat entisestään aikakauden elinikätestausta. Koska elinikätestaus oli hidasta, epäluotettavaa ja resurssipainotteista, uusia menetelmiä ja käytäntöjä alettiin kehittää. Näiden tavoitteena oli tehdä elinikätestauksesta nopeampaa, edullisempaa ja paremmin nykyaikaisen teknologian vaatimuksia vastaavaa.

3.2. Nykypäivän teoria ja standardi

Nykyisen elinikätestauksen kiinnostuksen kohteena ovat vikaantumisen syyt ja vikaantumisaika (TTF, *time to failure*) jo tuotteen tai komponentin suunnitteluvaiheessa. Aikaisempi elinikätestaus ei pystynyt suoraan osoittamaan, mistä tuotteen tai komponentin

vikaantuminen johtui. Elinikätestit ovat merkittävä osa tuotteen tai komponentin luotettavuuden arviointia. Seuraavat elinikätestit ovat tämän työn tutkimuksen kohteena.

ALT (*accelerated life testing*) on kvantitatiivinen elinikätesti, jossa käytetään jotakin stressintekijää, kuten lämpötilaa, mekaanista rasitusta tai kosteutta, kiihdyttämään komponentin tai tuotteen vikaantumista (Collins et al. 2024, 4). Kvantitatiivisuus tarkoittaa elinikätestauksen kontekstissa jonkin konkreettisen muutoksen, kuten vikaantumisen, havaitsemista mitattavassa muodossa esimerkiksi tuotteen tai komponentin vikaantumisaikana. ALT:stä on olemassa myös bayesilainen versio. Siinä sovelletaan bayesilaisia menetelmiä, joissa käytetään aiempaa tietoa elinikätestin datan kanssa saavuttaakseen paremman tilastollisen tarkkuuden (Zhang & Meeker 2006, 49). Aiempi tieto voi olla esimerkiksi tuotteen aktivoitumisenergia ALT-testissä tai elinikämallin parametrien arviot. Tätä tietoa ja ALT-testistä saatua otostietoa yhdistämällä voidaan muodostaa Bayesin kaavan avulla posteriorijakauma, joka vastaa ALT:n tuottamaa elinikäjakaumaa, mutta vaatii vähemmän havaintodataa. (Li & Meeker 2014, 1–3.)

ADT (*accelerated degradation testing*) on toinen kvantitatiivinen elinikätesti, jossa komponenttia tai tuotetta kuormitetaan tietyn materiaalin ominaisuuden muutoksen kiihdyttämiseksi. Tällaisia ominaisuuksia voivat olla esimerkiksi tiheys, murtolujuus tai huokoisuus. Molemmissa testeissä komponentit tai tuotteet altistetaan niiden normaalin toimintarajan ylittäville olosuhteille, minkä jälkeen käytetään kiihdytettyä elinikämallia korreloimaan kiihdytetty vikaantumisaika normaalin käytön vikaantumisaikaan. (Collins et al. 2024, 4.)

Korkeaa kosteutta sisältäviin käyttöympäristöihin soveltuvia elinikätestejä ovat esimerkiksi 85/85-ikääntymistesti ja HAST (*highly accelerated stress test*) (Sondhi et al. 2020, 444). 85/85-testissä stressintekijöinä käytetään vakioitua lämpötilaa (85 °C) ja suhteellista kosteutta (85 % RH) tuotteen tai komponentin eliniän arvioimiseksi näissä olosuhteissa. HAST-testi puolestaan sallii lämpötila- ja kosteusolosuhteiden vaihtelun välillä 100–175 °C ja 50–85 % RH (Gunn et al. 1981). Kun hiki toimii stressitekijänä tuotteen elinikäanalyysissä, AST (*accelerated sweat test*) soveltuu erityisesti puettavan elektroniikan ikääntymisen arviointiin hien vaikutuksen alaisena (Sondhi et al. 2020, 446).

Mekaanisen rasituksen testaamiseen käytettyjä elinikätestejä, joita tässä työssä tarkastellaan, ovat taivutuskoe (*bend test*), ryppytesti (*crease test*) ja porrasrasitustesti (*step stress test)*. Taivutuskoe arvioi mekaanista kestävyyttä, joustavuutta ja rakenteellista eheyttä esimerkiksi piirilevyissä. Ryppytestissä tarkastellaan materiaalin rypistymisen vaikutusta tuotteen tai komponentin elinikään jatkuvan paineen alaisena (Sondhi et al. 2020, 449). Porrasrasitustesti puolestaan määrittää tuotteen tai komponentin eliniän kasvattamalla kuormitusta vaiheittain vikaantumismekanismien tunnistamiseksi (Intertek 2026).

Näistä poikkeava menetelmä on kvalitatiivinen HALT (*highly accelerated life testing*), jonka tarkoituksena on löytää nopeasti tuotteen tai komponentin vikaantuminen käyttämällä kaikkia stressintekijöitä, kuten värinää, lämpöä ja jännitettä. Menetelmän päätavoitteena ei ole tuotteen kvantitatiivinen luotettavuusanalyysi, vaan vikaantumismekanismien tunnistaminen ja niiden ehkäiseminen tuotetta kehittämällä. (Collins et al. 2024, 2–3.) HALT-testin proseduuria voidaan toistaa mielivaltaisen useasti. HALT:n rinnalla käytetään usein HASS-testiä (*highly accelerated stress screening*), jossa sovelletaan jatkuvasti erilaisia stressintekijöiden yhdistelmiä. Nämä stressinrajat määritetään empiirisesti HALT-testauksen aikana, ja niiden avulla pyritään tunnistamaan piileviä vikaantumisia sekä mallin lujuuden heikentymisiä (Gray & Parschkewitz 2016, 30–31).

PoF (*physics of failure*), eli luotettavuusfysiikka, on menettelytapa, joka perustuu fyysisten vikaantumismekanismien ymmärtämiseen tuotteen luotettavuusanalyysissä ja ennakoinnissa. Menetelmä hyödyntää tieteellistä ja insinööritietoa vikaantumisen juurisyiden analysoimiseksi ja mahdollisten korjaustoimenpiteiden kestävyyden arvioimiseksi. (Collins et al. 2024, 8.)

Elinikätestauksessa käytetään useita erilaisia elinikämalleja, joilla voidaan kuvata tuotteen tai komponentin vikaantumista eri näkökulmista. Yksi yleisimmin käytetyistä on Coxin suhteellinen semiparametrinen riskimalli (Cox proportional hazards model, CoxPH) tai Coxin suhteellisen vaaran malli, joka olettaa, että riskifunktio h(t), eli hetkellinen vikaantumisriski, pysyy vakiona eri komponenttien välillä silloin, kun kovariantit on säädetty (Parii et al. 2025, 3). Kovariantit kuvaavat todennäköisyyslaskennassa satunnaismuuttujien välistä riippuvuutta. Tässä yhteydessä semiparametrinen malli tarkoittaa mallia, joka yhdistää parametrisen ja ei-parametrisen lähestymistavan piirteitä. Parametrisissa menetelmissä oletetaan tietty jakauma, kun taas ei-parametrisissa menetelmissä tällaisia jakaumaoletuksia ei tehdä (Helsingin yliopisto 2017).

Toinen tässä tutkimuksessa käsiteltävä elinikämalli on ei-parametrinen Kaplan–Meier-malli (*Kaplan–Meier model*, KM). Menetelmä jakaa elinaika-aineiston ryhmiin, laskee kunkin ryhmän vikaantumistahdin ja muodostaa approksimaation elinaikatodennäköisyydestä jokaiselle todennäköisyyssäiliölle (Parii et al. 2025, 3).

Kolmantena käsitellään Weibull-mallia, joka on yksi yleisimmin käytetyistä elinikämalleista elinikäanalyysissä. Weibull-malli on täysparametrinen jakauma, joka hyödyntää sekä Coxin mallia että nopeutettua vika-aikamallia (*accelerated failure time model*, AFT). AFT-malli tarkastelee elinaika-aikoja log-lineaarisen mallin avulla siten, että vaikutukset ilmaistaan elinaikojen suhteellisena kasvuna tai vähenemisenä. (Prentice & Kalbfleisch 1979, 25–39; Collett 1994; Carrollin 2003, 683 mukaan.) Täysparametrinen menetelmä tarkoittaa mallia, jossa kaikki olennaiset parametrit määritetään eksplisiittisesti.

Tämän tutkimuksen päätavoitteena on tarkastella eri elinikätestausmenetelmiä, joten elinikämallit eivät ole tutkimuksen varsinainen kohde. Niiden tunteminen on kuitenkin tärkeää, sillä ne muodostavat olennaisen osan tuotteen tai komponentin elinikätestausprosessia.

Edellä esitetyn teorian ja käytäntöjen tarkastelun jälkeen voidaan analysoida näiden menetelmien vahvuuksia ja heikkouksia eri yhdistelmissä, vertailla niitä keskenään sekä arvioida niiden soveltuvuutta langattomien nappikuulokkeiden elinikätestausmenetelminä. Elinikätestausmenetelmät koostuvat elinikätesteistä ja niissä käytetyistä stressintekijöistä. Näillä menetelmillä kerätään dataa tuotteen tai komponentin eliniästä, minkä jälkeen data mallinnetaan selkeään ja tulkittavaan muotoon elinikämallien avulla.

4. TULOKSET

Elektroniikkatuotteiden kehityksessä on otettava huomioon seuraava periaate: mitä paremmin tuotteen suorituskyky varmistetaan jo suunnitteluvaiheessa eri stressinrajojen ja FLT:n (*fundamental limit of technology*) näkökulmasta, sitä suurempi toleranssi tuotteella saavutetaan erilaisia stressintekijöitä vastaan. Tällöin voidaan ehkäistä tai lieventää tuotannon aikana syntyviä mahdollisia lujuusvariaatioita komponenteissa ja alasysteemeissä. (Gray & Parschkewitz 2016, 133.) FLT tarkoittaa "stressitasoa, jossa pieni lisäys kuormituksessa aiheuttaa suuren kasvun vikaantumisten määrässä" (Criscimagna 1999; Bomanin 2005, 577 mukaan). Tämän vuoksi on olennaisen tärkeää pohtia jo suunnitteluvaiheessa, miten tuotteen tai komponentin elinikää voidaan testata, jotta lopputuotteesta saadaan mahdollisimman luotettava ja kestävä sekä asiakkaan että valmistajan näkökulmasta. Sama pätee myös tämän työn tarkastelun kohteena oleviin langattomiin nappikuulokkeisiin.

Tuloksina saadaan erilaisia käytäntöjä ja menetelmiä, joita voidaan hyödyntää langattomien nappikuulokkeiden elinikätestauksessa. Tässä luvussa analysoidaan kirjallisuuskatsauksen avulla eri elinikätestausmenetelmien vahvuuksia ja heikkouksia komponentin tai tuotteen luotettavuuden arvioinnissa sekä päätellään, mikä menetelmistä olisi optimaalisin ja luotettavin tämän tutkimuksen kuulokkeiden elinikätestauksessa. Kaikki tulokset liittyvät kuluttajaelektroniikan elinikätestaukseen, jotta niitä voidaan soveltaa langattomien nappikuulokkeiden eliniän arviointiin.

Ensin tarkastellaan eri elinikätestien vaikutusta elinikätestaukseen ja sitä, miten niitä voidaan soveltaa erilaisissa elinikätestausmenetelmissä. Tämän jälkeen analysoidaan eri stressintekijöiden ja niiden määrän vaikutusta elinikätestaukseen sekä sitä, miten niitä hyödynnetään eri elinikätestimenetelmissä. Näiden alalukujen jälkeen arvioidaan, mikä tässä työssä käsitellyistä elinikätestausmenetelmistä soveltuu parhaiten langattomien nappikuulokkeiden elinikätestaukseen. Lopuksi tarkastellaan tulevaisuuden elinikätestausmenetelmiä ja arvioidaan, miten niitä voitaisiin mahdollisesti soveltaa tämän tutkimuksen kuulokkeiden elinikätestauksessa.

4.1. Eri elinikätestien vaikutus elinikätestauksessa

Elinikätestien avulla saadaan komponentin tai tuotteen eliniästä dataa, jonka mallintamisen avulla muodostetaan käsitys kyseisen komponentin tai tuotteen kestävyydestä tiettyä stressintekijää tai stressintekijöiden yhdistelmää vastaan. Monet elinikätesteistä toimivat eri tavoin, sillä niiden tarkoitukset vaihtelevat testattavan tuotteen tai komponentin mukaan. Jotta testaus olisi tarkoituksenmukaista, kustannustehokasta ja luotettavaa, sopivien elinikätestien valinnalla on suuri merkitys siinä, millaista dataa testauksen avulla halutaan saada. Tämä on erityisen tärkeää langattomien nappikuulokkeiden elinikätestausmenetelmiä arvioitaessa.

4.1.1. ALT ja ADT

Yksi elektroniikkateollisuuden yleisimmin käytetyistä elinikätesteistä on ALT, joka on nopeuttanut laboratoriotestausta säilyttäen samalla korkean luotettavuuden (Chunsheng et al. 2009). Arrowsmithin (2017, 1) mukaan ALT on teollisuuden standardimenetelmä tuotteen eliniän määrittämiseen, ja sitä sovelletaan useimmiten komponentti- tai alasysteemitason

analyysiin. ALT hyödyntää yleensä kahta tai useampaa stressitekijää, jolloin testiparametrien valinnalla on merkittävä vaikutus testin optimointiin (Arrowsmith 2017, 1).

ALT-testissä on tärkeää välttää liian korkeita kuormitustasoja, sillä ne voivat aiheuttaa satunnaisia vikaantumismekanismeja, joita ei ilmene normaalikäytössä (Gray & Parschkewitz 2016, 169–170; Arrowsmith 2017, 1). Langattomien nappikuulokkeiden eliniän testaamiseen ALT ei kuitenkaan yksinään sovellu erityisen hyvin, sillä sen optimointi on työlästä eikä menetelmä huomioi riittävän kattavasti ympäristön dynaamisten muuttujien välisiä vuorovaikutuksia. Koska tämän työn kuulokkeet on suunniteltu ulkokäyttöön, jossa vaihtelevat ympäristöolosuhteet vaikuttavat tuotteen elinikään, on tarkoituksenmukaisempaa hyödyntää muita elinikätestejä. ALT:n käytössä on lisäksi huomioitava mahdolliset korkeat kustannukset sekä se, ettei tuotteen tai komponentin vikaantumisaikaa välttämättä pystytä havaitsemaan realistisen testausjakson aikana (Arrowsmith 2017, 1; Sanchez & Pan 2009, 1). Yksi varteenotettava vaihtoehto on bayesilainen ALT, joka voi säästää aikaa ja kustannuksia verrattuna perinteiseen ALT-menetelmään (Li & Meeker 2014, 1).

ADT on puolestaan hyödyllinen elinikätesti, koska se huomioi myös ulkoisten stressitekijöiden keskinäiset vuorovaikutukset. Se tarkastelee stressitasojen ja tuotteen varmuuskertoimien välistä yhteyttä, minkä avulla voidaan rakentaa kestävämpi malli ulkoisia rasituksia vastaan. (Sanchez & Pan 2009, 1.) Varmuuskerroin tarkoittaa suunnittelussa ja mitoituksessa käytettävää suuretta, joka kuvaa komponentin suurimman sallitun kuormituksen suhdetta sen murtolujuuteen.

ADT:tä voidaan hyödyntää elektroniikkatuotteisissa silloin, kun avainsuoritusparametreja eli stressintekijöitä voidaan seurata sensoreiden tai säännöllisten tarkastusten avulla. Tämä lähestymistapa vähentää merkittävästi satunnaisten vikaantumisten määrää ja odottamattomia käyttökatkoksia tuotteen toiminnan aikana. (Gray & Parschkewitz 2016, 166–167.) ADT kattaa hyvin langattomien nappikuulokkeiden ulkoisen käytön stressinrajat samalla mitaten sisäisen käytön stressinrajat. Tämän vuoksi tämä elinikätesti on optimaalinen langattomien nappikuulokkeiden elinikätestauksessa. Se tarjoaa myös mahdollisuuksia jatkotutkimuksille liittyen varmuuskertoimien vaikutukseen tuotteen luotettavuudessa. Tämä parantaa tuotteen suunnittelua ja tällöin tehokkuutta. ADT:n käyttöönottoa vaikeuttaa kuitenkin testin monimutkaisuus ja testaajalta vaadittava asiantuntemus (Sanchez & Pan 2009, 2).

4.1.2. 85/85-ikääntymistesti, HAST ja AST

Muita huomionarvoisia elinikätestejä langattomien nappikuulokkeiden elinikätestaukseen ovat 85/85-ikääntymistesti, HAST ja AST. Näitä elinikätestejä käytetään laajasti arvioidakseen jatkuvan ikääntymisen ja kuluttajaelektroniikan eliniän arviointiin (Mikkonen & Mäntysalo 2018; Sondhin et al. 2020, 446 mukaan). 85/85-ikääntymistesti on elektroniikkateollisuudessa yleisesti käytetty standardi (Ranjan 2022). HAST-testiä käytetään usein 85/85-testin kanssa tulosten vertaamiseksi ja sen arvioimiseksi, kykeneekö tuote kestämään kyseiset olosuhteet (Danielson et al. 1989, 120). Langattomien nappikuulokkeiden kohdalla on tärkeää huomioida niiden kestävyys kosteutta ja hikeä vastaan, sillä hiki sisältää ioneja ja happoja, jotka voivat vahingoittaa elektroniikkaa (Sondhi et al. 2020, 446). Tämän vuoksi näiden testien hyödyntäminen kuulokkeiden elinikätestauksessa olisi erittäin tarkoituksenmukaista.

4.1.3. Taivutuskoe, ryppytesti ja porrasrasitustesti

Turvallinen toiminta mekaanisen kuormituksen alaisena on yksi pitkäikäisen puettavan elektroniikan keskeisistä vaatimuksista (Wang et al. 2023, 1). Langattomien nappikuulokkeiden on kestettävä erilaisia ulkoisia mekaanisia rasituksia, joita niiden kentällä esiintyy. Mekaanisen rasituksen vaikutusten tutkimiseen voidaan hyödyntää taivutuskoetta, ryppytestiä ja porrasrasitustestiä. Näiden avulla voidaan arvioida erilaisten mekaanisten rasitusten vaikutuksia tuotteeseen tai komponenttiin. Langattomien nappikuulokkeiden kohdalla hyödyllisin näistä menetelmistä on porrasrasitustesti, koska siinä voidaan soveltaa useita stressitekijöitä samanaikaisesti. Taivutuskoe ja ryppytesti puolestaan keskittyvät yleensä yhden stressitekijän vaikutukseen kerrallaan. Kun kuulokkeita testataan useilla mekaanisilla rasituksilla samanaikaisesti, voidaan havaita niiden stressirajat sekä eri stressitekijöiden väliset vuorovaikutukset, jotka voivat merkittävästi heikentää tuotteen elinikää.

4.1.4. HALT ja HASS

Viimeisenä tarkasteltavana elinikätestinä on kvalitatiivinen HALT. Teollisuudessa kyseistä testiä käytetään useimmiten tuotteen tai komponentin suunnitteluvaiheessa vikaantumismekanismien nopeaan tunnistamiseen. HALT hyödyntää kaikkia stressintekijöitä samanaikaisesti, eikä sen tavoitteena ole simuloida todellisia käyttöolosuhteita, vaan löytää suunnittelun heikot kohdat nopeasti ja tehokkaasti käyttämällä vain muutamia testikappaleita lyhyessä ajassa. (Collins et al. 2024, 2–3.)

Ennen testausta tehtävä PoF-analyysi voi auttaa tunnistamaan mahdollisia vikaantumismekanismeja sekä määrittämään sopivia stressitekijöitä ja niiden tasoja HALT-testauksessa (Collins et al. 2024, 8). HALT ja PoF muodostavat yhdessä tehokkaan ja kustannustehokkaan yhdistelmän suunnitteluvaiheen vikaantumisten tunnistamiseen. Langattomien nappikuulokkeiden kehityksessä nämä menetelmät tarjoavat hyvän perustan myöhemmälle elinikätestaukselle, koska niiden avulla voidaan tunnistaa kuulokkeiden keskeiset vikaantumismekanismit jo varhaisessa vaiheessa. Collins (2024, 17) kuitenkin huomioi, ettei HALT yksinään tuota tarkkoja kvantitatiivisia arvoja esimerkiksi elinikäjakaumasta tai vikataajuudesta. Tämän vuoksi HALT-testauksen jälkeen on perusteltua käyttää jotakin kvantitatiivista elinikätestiä tuotteen stressirajojen empiiriseen varmistamiseen (Collins et al. 2024, 17).

Yksi HALT-testauksen arvokkaimmista tuloksista on mahdollisuus vertailla stressirajoja samanlaisiin tai aiemmin testattuihin tuotteisiin. Jokainen HALT-prosessi on kuitenkin ainutlaatuinen, ja se muodostaa oman oppimisprosessinsa kullekin elektroniikkajärjestelmälle. (Gray & Parschkewitz 2016, 30–33.) Jos langattomista nappikuulokkeista on saatavilla aiempia HALT-tutkimuksia, niiden hyödyntäminen olisi erittäin arvokasta tuotteen kehityksen kannalta.

Jos aikaisempaa tietoa ei ole saatavilla, on realistista odottaa, että osa vikaantumisista ilmenee vasta tuotantovaiheessa. Tällaisissa tilanteissa käytetään usein HASS-testiä, erityisesti silloin, kun tuotteen laatu ei vielä vastaa valmistajan asetettuja tavoitteita (Gray & Parschkewitz 2016, 139–140). HASS soveltuu hyvin piilevien vikojen nopeaan tunnistamiseen tuotantovaiheessa. Se on erityisen hyödyllinen silloin, kun tuotantoa skaalataan nopeasti ja uuden tuotteen valmistukseen liittyy vielä oppimiskäyrän aiheuttamia laatuhaasteita. (Gray & Parschkewitz 2016, 133–134.)

Tämän tutkimuksen kuulokkeiden kohdalla HASS-testiä kannattaa käyttää lähinnä tilanteissa, joissa tuotteen laatu ei HALT-testauksen jälkeenkään täytä valmistajan asettamia tavoitteita. Tämä johtuu siitä, että HALT tarjoaa yleensä paremman kustannushyötysuhteen, kun taas HASS voi kuluttaa enemmän resursseja tuotteen valmistuksessa (Gray & Parschkewitz 2016, 133–134).

4.1.5. Yhteenveto

Tulosten perusteella voidaan todeta, että jatkuva ja systemaattinen testaus on tärkeää langattomien nappikuulokkeiden eliniän varmistamisessa ja parantamisessa. Elinikätestinä ADT on yleisesti suosittu elektroniikkateollisuudessa, koska se huomioi myös stressintekijöiden väliset vuorovaikutukset. ALT puolestaan keskittyy enemmän vakioitujen testiolosuhteiden vaikutuksiin testattavaan tuotteeseen tai komponenttiin.

Langattomien nappikuulokkeiden elinikätestaukseen ADT soveltuu hyvin niiden materiaalin kestävyyden testaukseen. Tämän lisäksi 85/85-ikääntymistesti, HAST ja AST sopivat kuulokkeille erityisesti kosteuden ja hien kestävyyden arvioimisessa. Mikäli tavoitteena on löytää nopeasti ja kustannustehokkaasti tuotteen keskeiset vikaantumismekanismit, HALT:n ja PoF:n yhdistelmä tarjoaa tähän tehokkaan ratkaisun jo suunnitteluvaiheessa.

Näiden elinikätestien hyödyntäminen yhdessä muodostaisi langattomien nappikuulokkeiden elinikätestaukseen kattavan ja nykyaikaisen testauskokonaisuuden, joka vastaa edustavasti nykypäivän elektroniikkateollisuuden käytäntöjä.

4.2. Eri stressintekijöiden vaikutus elinikätestauksessa

Jotta voidaan muodostaa tehokkaita ja luotettavia elinikätestausmenetelmiä, on olennaista ymmärtää, miten eri stressintekijät vaikuttavat testattavan tuotteen tai komponentin elinikään. Tuotteesta tai komponentista riippuen jotkin stressintekijät soveltuvat elinikädatan keräämiseen paremmin kuin toiset. Tässä alaluvussa käsitellään tutkimuksessa tarkasteltuja stressintekijöitä ja arvioidaan niiden soveltuvuutta langattomien nappikuulokkeiden elinikätestauksessa.

4.2.1. Lämpö

Elektroniikan elinikätestauksessa yleisimpiä stressintekijöitä ovat lämpö, kosteus ja jännite (Keil & Hofmann 2021, 2). Lämpö on yksi käytetyimmistä stressintekijöistä elinikätestauksessa, koska sen avulla pyritään varmistamaan, etteivät tuotteen sisäiset johdotukset ja komponentit vaurioidu johtaen mahdollisiin epätoivottuihin oikosulkuihin. Lämmöllä on myös muita vaikutuksia elektroniikkaan. Näitä ovat esimerkiksi vuotovirran eksponentiaalinen kasvu, korroosion eteneminen, sähköinen ylikuormitus, kuten lämpöläpilyönti, sekä altistuminen staattiselle purkaukselle (ESD) (Khanna 2023, 57–58; Lall et al. 1995, 386–390).

Langattomien nappikuulokkeiden kannalta lämpö on tärkeä stressintekijä ottaa huomioon elinikätestauksessa. Mitä korkeammiksi lämpötila- ja kosteusarvot kasvavat, sitä nopeammin

joustavan elektroniikan substraatti eli pohjamateriaali ikääntyy, mikä osoittaa positiivista korrelaatiota näiden tekijöiden välillä (He et al. 2026, 8). Lämmön simulointiin käytetään yleisimmin lämpösykliä, jossa lämpötilaa muutetaan asteittain säännöllisin aikavälein. Kuluttajaelektroniikassa sopivana lämpötila-alueena pidetään yleensä –40 °C:n ja 85 °C:n välistä lämpösykliä, koska tällöin toimitaan vähemmän vaativissa lämpöolosuhteissa. Korkean luotettavuuden sovelluksissa käytetään laajempia lämpötila-alueita pitkäkestoisen kestävyyden arvioimiseksi, kun taas kohtalaiset lämpötilan variaatiot riittävät kuluttajaelektroniikalle. (Sumaiya et al. 2025, 2.) Koska langattomat nappikuulokkeet kuuluvat kuluttajaelektroniikan kategoriaan, voidaan olettaa, että edellä mainittu lämpötila-alue soveltuu riittävän hyvin niiden elinikätestaukseen. Tällä tavoin voidaan arvioida kuulokkeiden lämmönkestävyyttä käytännön olosuhteissa.

4.2.2. Kosteus

Kosteus on yksi oleellisimmista stressintekijöistä elektroniikan toiminnallisuuden ja kestävyyden arvioinnissa, kuten edellisessä alaluvussa todettiin. Korkea kosteus yhdessä muiden ympäristöolosuhteiden ja elektronisten komponenttien kanssa voi aiheuttaa useita korroosioon liittyviä vikaantumismekanismeja (Ambat 2022, 12–13).

Elektroniikassa tämä ilmenee kokoonpantujen piirilevyjen vaurioitumisena. Kosteus muodostaa piirilevyn pinnalle vesikalvon, joka voi yhdistää metallisia materiaaleja tai piirilevyn esijännitettyjä pisteitä toisiinsa ja käynnistää elektrokemiallisia prosesseja (Ambat 2022, 12–13). Elektrokemialliset prosessit tarkoittavat kemiallisia reaktioita, joissa sähköenergia ja kemialliset ilmiöt ovat vuorovaikutuksessa toistensa kanssa. Nämä ilmiöt voivat heikentää komponenttien suorituskykyä ja johtaa vakaviin toimintahäiriöihin tai vikaantumisiin (Ambat 2022, 148–149).

Langattomien nappikuulokkeiden kohdalla kosteuden testaaminen on tärkeää, koska niiden kenttä on dynaaminen ja vaihtelee sisä- ja ulkotilojen välillä. Käyttöolosuhteissa voi esiintyä suuria vaihteluita kosteuspitoisuuksissa. Lisäksi hien vaikutus on huomioitava erityisesti sellaisissa tilanteissa, joissa käyttäjä liikkuu aktiivisesti ulkona ja hikoilee runsaasti. Kuulokkeiden kosteudenkestävyyttä voidaan parantaa altistamalla niiden kokoonpantu piirilevy elinikätesteissä korkeille kosteuspitoisuuksille tai vaihteleville ilmasto-olosuhteille ilman, että tuotteessa ilmenee vikaantumisia testauksen aikana (Ambat 2022, 409–410).

4.2.3. Mekaaninen rasitus

Mekaanisen rasituksen simulointi on tärkeää langattomien nappi kuulokkeiden elinikätestauksessa, koska sillä on merkittävä vaikutus tuotteen kestävyyteen. Lämpökuormat aiheuttavat yleensä lieviä vikoja elektroniikassa, kun taas värinäkuormituksilla on suurempi todennäköisyys aiheuttaa katastrofaalisia vikaantumisia (Gray & Parschkewitz 2016, osa 6.8; Collinsin et al. 2024, 5 mukaan). Lievä vika tarkoittaa vikaantumismekanismia, joka poistuu kuormituksen loputtua ja järjestelmän uudelleenkäynnistyksen jälkeen. Katastrofaalinen vikaantuminen puolestaan tarkoittaa tilannetta, jossa systeemin toiminta ei palaudu ilman korjaustoimenpiteitä tai rakenteellisia muutoksia.

Taulukko 1. Vikaantumisten havaitseminen prosentteina stressintekijän mukaan. Data on kerätty HALT-testaukseen liittyvästä “shake and bake” -menetelmästä. (McLean 2009, Collinsin et al. 2024, 6 mukaan.)

Stressintekijä	**Vikaantumisten havaitseminen (%)**
Värinän porrasrasitustestaus	45
Kuuden vapausasteen (6-DOF) värinä ja nopeat lämpötilamuutokset	20
Korkean lämpötilan porrasrasitustestaus	17
Matalan lämpötilan porrasrasitustestaus	14
Nopeat lämpötilasiirtymät	4

Taulukon perusteella värinän simulointi on erityisen hyödyllistä langattomien nappikuulokkeiden elinikätestauksessa, koska sen avulla voidaan havaita vikaantumisia tehokkaammin verrattuna taulukon (1) muihin stressintekijöihin.

Jatkuvalle taivuttamiselle altistuvat sovellukset, kuten joustavat piirilevyt, vaativat kuitenkin myös tutkimusta vääntämisen ja taittamisen vaikutuksista (Sondhi et al. 2020, 444). Mitä tämän tutkimuksen kuulokkeisiin tulee, nämä rasitukset voivat vaikuttaa enemmän kuulokkeiden koteloon kuin itse kuulokkeisiin niiden pienen koon vuoksi. Tämän seurauksena vääntämisen ja taittamisen vaikutukset itse kuulokkeisiin voivat jäädä vähäisiksi.

Hen et al. (2026, 8) mukaan taivutussäteellä on vain vähäinen vaikutus tuotteen resistanssiin tai sen muutoksiin. Resistanssin kasvu voi kuitenkin vaikuttaa piirilevyn maadoituksiin ja heikentää laitteen toimintaa. Koska kyseinen tutkimus on tuore eikä sitä ole vielä vertaisarvioitu, sen tuloksiin tulee suhtautua varauksella. Tästä syystä on arvioitava kriittisesti, kuinka luotettavina ja käyttökelpoisina tuloksia voidaan pitää uusien elektroniikkatuotteiden suunnittelussa. Tämän tutkimuksen näkökulmasta taivuttamista ja vääntämistä voidaan soveltaa kuulokkeiden kotelon testauksessa. Itse kuulokkeiden osalta hyödyllisin mekaanisen rasituksen muoto on värinätestaus.

4.2.4. Stressintekijöiden määrä elinikätesteissä

Yhden stressintekijän käyttö elinikätestauksessa on nykyisin harvinaista, vaikka sillä on joitakin etuja. Yksi keskeinen etu on testauksen hallittavuus: kun käytössä on vain yksi stressitaso, sen kontrollointi laboratorio-olosuhteissa on yksinkertaisempaa. Esimerkki tällaisesta menetelmästä on porrasrasitustesti (step-stress) yhdistettynä ALT-testiin. Tämän menetelmän suunnittelu ja optimointi ovat herättäneet laajaa kiinnostusta luotettavuus- ja insinööritieteellisessä kirjallisuudessa. (Balakrishnan et al. 2020, 1917.)

Käytännössä useiden stressintekijöiden samanaikainen käyttö on kuitenkin yleisempi lähestymistapa elinikätestauksessa. Eri stressintekijöiden yhdistelmät tuottavat enemmän vikaantumisia ja tarjoavat siten kattavamman ja luotettavamman kuvan tuotteen eliniästä (Keil & Hofmann 2021, 2). Sopiva testausmenetelmä riippuu kuitenkin aina testattavasta tuotteesta tai komponentista.

Langattomien nappikuulokkeiden kohdalla useiden kuormitustasojen huomioiminen on perusteltua, sillä mitä useampia stressintekijöitä elinikätestissä käytetään, sitä realistisempi kokonaiskuva saadaan kuulokkeiden kestävyydestä todellisissa käyttöolosuhteissa. Jos tuotetta

testataan vain yhden stressintekijän avulla, elinikäanalyysi voi jäädä puutteelliseksi eikä huomioi stressintekijöiden välisten vuorovaikutusten vaikutuksia tuotteen elinikään (Collins et al. 2024, 17).

4.2.5. Yhteenveto

Langattomia nappikuulokkeita on perusteltua testata useilla eri stressintekijöillä, koska niiden käyttöympäristö on vaativa ja vaihtelevat olosuhteet asettavat tiukempia vaatimuksia tuotteen kestävyydelle. Tämän alaluvun perusteella voidaan päätellä, että lämpö, kosteus, hiki ja värinä ovat keskeisimmät stressintekijät, jotka tulisi huomioida kuulokkeiden suunnittelu- ja testausvaiheessa.

Näiden stressintekijöiden samanaikainen testaaminen antaa kattavamman kuvan siitä, miten kuulokkeet kestävät eri olosuhteiden yhteisvaikutuksia. Tämän vuoksi monen stressintekijän käyttö on langattomien nappikuulokkeiden elinikätestauksessa perustellumpaa ja tehokkaampaa kuin yksittäisten stressintekijöiden erillinen tarkastelu.

4.3. Optimaaliset elinikätestausmenetelmät langattomien nappikuulokkeiden elinikätestauksessa

Langattomien nappikuulokkeiden eliniän testaamisessa täytyy huomioida monia eri seikkoja, sillä näiden kenttä asettaa tiukkoja vaatimuksia tuotteen kestävyydelle ja toiminnalle. Näitä tekijöitä voivat olla esimerkiksi lämpötilan ja kosteuden vaihtelut, hien aiheuttama rasitus sekä voimakas värinä. Tässä yhteydessä on hyvä mainita myös elinikätestauksessa käytettävät standardit, joita noudatetaan eri puolilla maailmaa. Kaksi yleisesti käytettyä standardia ovat IEC 60068 ja SN 29500. Näistä jälkimmäistä käytetään laajalti vikatiheyden laskemiseen. Standardi perustuu ennalta määriteltyihin vertailuolosuhteisiin ja korjauskertoimiin, joiden avulla voidaan arvioida komponentin tai tuotteen vikataajuutta käyttöolosuhteissa. (Siemens AG 2004; Aksun et al. 2025, 64 mukaan.) Näiden standardien avulla voidaan verrata kuulokkeiden vikaantumisaikoja sallittuihin raja-arvoihin. Koska eri elinikätestausmenetelmät tuottavat erilaista dataa, standardien hyödyntäminen testausvaiheessa on suositeltavaa. Elinikätestaukseen liittyviä standardeja on luonnollisesti muitakin, mikäli valmistaja haluaa käyttää jotakin muuta standardia kuin tässä työssä mainittuja. Olennaisinta on kuitenkin verrata kuulokkeiden elinikätestauksen tuloksia ennalta määriteltyihin raja-arvoihin, jotta tuotteeseen voidaan tehdä tarvittavia muutoksia, mikäli jokin tulos ei täytä standardin vaatimuksia.

Alalukujen 3.1. ja 3.2. perusteella voidaan tunnistaa elektroniikan elinikätestauksessa käytettävät elinikätestit ja stressintekijät sekä arvioida, mitkä niistä soveltuvat parhaiten langattomien nappikuulokkeiden elinikätestaukseen. Näiden tietojen pohjalta voidaan muodostaa tehokkaita ja tarkoituksenmukaisia elinikätestausmenetelmiä kuulokkeiden toiminnallisuuden ja kestävyyden arviointiin. Jotta testaus pysyisi kustannustehokkaana, elinikätestaus tulee toteuttaa hallitusti ja suorittaa vain tarvittava määrä testejä riittävän elinikädatan saamiseksi ilman tarpeetonta resurssien kulutusta. Näiden lähtökohtien perusteella voidaan määrittää, mikä elinikätestausmenetelmistä on optimaalisin langattomien nappikuulokkeiden elinikätestauksessa samalla säilyttäen testauksen tehokkuuden, luotettavuuden ja kannattavuuden mahdollisimman korkealla tasolla.

Kaikkein kattavin ja luotettavin elinikätestausmenetelmä olisi yhdistää kaikki tässä työssä tarkastellut optimaaliset elinikätestit ja stressintekijät samaan testauskokonaisuuteen. Tällöin kuulokkeiden eliniästä saataisiin mahdollisimman laaja kokonaiskuva. Käytännössä tällainen ratkaisu ei kuitenkaan ole kaikkein järkevin, sillä elinikätestauksen kustannukset voisivat nousta liian suuriksi suhteessa tuotteen resursseihin. Edullisin vaihtoehto olisi käyttää samanaikaisesti pelkästään HALT-testiä ja PoF-menetelmiä yhdessä, mutta tällöin kaikkia tutkimuksen kuulokkeille asetettuja vaatimuksia ei pystyttäisi huomioimaan riittävän kattavasti. Tällaisia vaatimuksia ovat esimerkiksi kestävyyden varmistaminen empiirisesti hien aiheuttamaa rasitusta ja voimakasta värinää vastaan. Seuraava taulukko (2) esittää elinikätestausmenetelmän, joka huomioi langattomien nappikuulokkeiden elinikätestauksen tehokkuuden, luotettavuuden ja kustannustehokkuuden sekä pyrkii täyttämään SN 29500 -standardin vaatimukset mahdollisimman hyvin.

Taulukko 2. Optimaalinen elinikätestausmenetelmä langattomien nappikuulokkeiden elinikätestauksessa.

Järjestys (nro.)	**Elinikätesti**	**Stressintekijä(t)**	**Vaihe**
1.	HALT (+ PoF)	kaikki	suunnittelu
2.	AST	hiki	suunnittelu
3.	värinän porrasrasitustesti	värinä	suunnittelu
4.	HASS (tarvittaessa)	lämpö, kosteus, värinä	tuotanto

Elinikätestausmenetelmää voidaan muokata valmistajan tavoitteiden mukaan. Jos esimerkiksi kuulokkeiden kestävyyttä halutaan arvioida ADT:n avulla, testi voidaan lisätä osaksi menetelmää tai korvata jokin nykyisistä testeistä sillä. Sama koskee myös käytettäviä stressintekijöitä. Suositeltavaa on kuitenkin säilyttää HALT ensimmäisenä testinä ja HASS viimeisenä testinä kaikissa mahdollisissa elinikätestausmenetelmissä, jotta tuotteen laatu voidaan varmistaa mahdollisimman tehokkaasti koko suunnittelu- ja tuotantoprosessin ajan. Mikäli tuotteessa havaitaan puutteita suunnittelu- tai tuotantovaiheessa, nämä testit auttavat tunnistamaan vikaantumismekanismit, minkä jälkeen tuotetta voidaan kehittää edelleen tarpeen mukaan.

Taulukossa 2 esitetty menetelmä kuvaa yleistä elinikätestauskokonaisuutta, jota voidaan hyödyntää langattomien nappikuulokkeiden valmistuksessa tämän tutkimuksen kirjallisuuskatsauksen perusteella.

4.4. Tulevaisuuden menetelmät elinikätestauksessa

Yksi uusi kehityssuunta elinikätestauksen alueella on digitaalisen kaksosen hyödyntäminen. Digitaalinen kaksonen automatisoi PoF-mallien soveltamista elektroniikkakokoonpanojen suunnittelussa, kuten piirilevyjen analysoinnissa. (Collins et al. 2024, 9.) Tämän menetelmän avulla voidaan tukea tiedon jatkuvuutta koko tuotteen elinkaaren ajan sekä ennakoida järjestelmän käyttäytymistä tuotteen suunnitteluvaiheessa ja myöhemmissä elinkaaren

vaiheissa tietokoneavusteisten simulaatioiden avulla (Haag & Anderl 2018, 64). Kun tuotteesta on olemassa virtuaalinen vastine fyysiselle tuotteelle, voidaan säästää sekä aikaa että resursseja elinikätestauksen suunnitteluvaiheessa. Menetelmän haasteena on kuitenkin se, että digitaalinen kaksonen täytyy kehittää fyysisen tuotteen rinnalla, mikäli valmista virtuaalista mallia ei ole jo olemassa (Haag & Anderl 2018, 64). Mikäli langattomille nappikuulokkeille olisi saatavilla virtuaalinen vastine, sitä voitaisiin hyödyntää tehokkaasti elinikätestauksen tukena, koska kuulokkeiden elinkaaren vaiheet ja stressinrajat olisivat tiedossa jo suunnitteluvaiheessa. Tämän jälkeen kuulokkeita voidaan kehittää edelleen suunnittelijan tavoitteiden mukaisesti.

Toinen tapa säästää resursseja suunnitteluvaiheessa on hyödyntää muiden yritysten ja tutkimuslaitosten julkaisuja, jotka käsittelevät samankaltaisten tuotteiden eliniän määrittämistä (Keil & Hofmann 2021, 2). Langattomien nappikuulokkeiden osalta tämän tutkimuksen kirjoittamisen aikana ei kuitenkaan löytynyt suoraan aiheeseen liittyviä elinikätutkimuksia, minkä vuoksi tämä menetelmä ei ole kaikista pätevin tapa hyödyntää tämän tutkimuksen kuulokkeiden käyttöiän määrittämisessä.

Seuraava tutkimussuunta ei varsinaisesti esittele uutta elinikätestausmenetelmää, mutta se voi muodostua tulevaisuudessa hyödylliseksi käytännöksi tuotteen kestävyyden arvioinnissa. Ennen varsinaista elinikätestausta elektroniikkakokoonpanoja altistetaan usein erilaisille lämpötiloille ennen niiden käyttöönottoa. Realistisemman ja konservatiivisemman arvion saavuttamiseksi ikäännytys kannattaa suorittaa ennen lämpösykliä. (Sumaiya et al. 2025, 7.) Tällainen käytäntö voisi parantaa myös langattomien nappikuulokkeiden käyttöiän arvioinnin luotettavuutta ja tarkkuutta.

Mikäli edellä kuvattuja uusia menetelmiä ja käytäntöjä pystytään hyödyntämään tämän tutkimuksen kuulokkeiden valmistuksessa, niiden avulla voidaan edelleen parantaa tuotteen luotettavuutta. Samalla on kuitenkin huomioitava menetelmien vaatimat resurssit ja arvioitava niiden todellinen hyöty käytännössä. Tässä tutkimuksessa esitetty optimaalinen elinikätestausmenetelmä kattaa jo hyvin langattomien nappikuulokkeiden elinikätestauksen luotettavasti ja kustannustehokkaasti. Mikäli valmistajalla on käytettävissään riittävästi resursseja, uusien menetelmien käyttöönotto voi kuitenkin tehostaa tuotteen elinikäanalysointia entisestään.

5. POHDINTA

Tämän tutkimuksen aikana ei tarkasteltu paineen vaikutusta elektroniikan käyttöikään. Mikäli aikaa olisi ollut enemmän käytettävissä, myös tämä stressintekijä olisi voitu sisällyttää tutkimukseen. Koska kyseessä oli tekijän ensimmäinen itsenäisesti laadittu tieteellinen tutkimus, kirjoitusprosessin aikana opittiin paljon tieteellisen kirjoittamisen käytännöistä ja vaatimuksista. Erityisesti aineiston kerääminen osoittautui merkittäväksi vaiheeksi tutkimusprosessissa. Ajoittain sopivaa aineistoa oli vaikea löytää riittävästi, mikä vaikutti tekstin tuottamiseen. Myös termien yhdenmukainen käyttö olisi voitu huomioida paremmin lopputekstissä, erityisesti käsitteiden *elinikä* ja *käyttöikä* osalta. Kokonaisuudessaan tutkimus kuitenkin onnistuttiin toteuttamaan suunnitellusti, ja sen perusteella voidaan jatkaa tieteellisten tutkimusten tuottamista aiempaa tehokkaammin ja varmemmin.

6. JOHTOPÄÄTÖKSET

Tutkimuksen tavoite saavutettiin tunnistamalla kirjallisuuskatsauksen avulla keskeisimmät elinikätestit ja stressintekijät sekä määrittelemällä optimaalisin elinikätestausmenetelmä langattomien nappikuulokkeiden käyttöiän arviointiin. Tutkimuksen tulokset perustuvat aiempaan tutkimuskirjallisuuteen, jota tässä työssä analysoitiin ja hyödynnettiin. Tutkimuksen perusteella voidaan todeta, että tietyt elinikätestausmenetelmät soveltuvat erityisen hyvin langattomien nappikuulokkeiden käyttöiän määrittämiseen. Työtä voidaan hyödyntää sekä langattomien nappikuulokkeiden että muiden vastaavien elektroniikkalaitteiden suunnittelussa. Tässä tutkimuksessa ei kuitenkaan tarkasteltu elinikätestausmenetelmien vaikutusta käyttöiän mallintamiseen käytännön laboratoriotesteissä. Jatkotutkimuksissa näitä menetelmiä voitaisiin soveltaa laboratorioympäristössä tutkimuksen tulosten luotettavuuden arvioimiseksi.

LÄHTEET

Aksu, O., Youn, J., Schmid, M., Bierwirth, F., Radosavac, M. & Herzog, H.-G. 2025. Multi-Condition Methodology for Stress Determination in the Reliability Assessment of Electrical Components. IEEE. 2025. Viitattu 11.4.2026. Saatavissa DOI: 10.1109/ZINC65316.2025.11103549

Ambat, R. 2022. Humidity and electronics: corrosion reliability issues and preventive measures. London, England ; Elsevier.

Arrowsmith, P. 2017. Improved method for ALT plan optimization. Teoksessa 2017 Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS). 1.2017. Viitattu 12.4.2026. Saatavissa DOI: 10.1109/RAM.2017.7889730

Balakrishnan, N., Castilla, E., Martín, N. & Pardo, L. 2020. Robust inference for one-shot device testing data under exponential lifetime model with multiple stresses. Quality and Reliability Engineering International. 36 (6), 1916–1930. Saatavissa DOI: 10.1002/qre.2665

Boman, R. 2005. Reliability and Acclerated Testing. ASQ World Conference on Quality and Improvement Proceedings. 59, 567–580.

Carroll, K.J. 2003. On the use and utility of the Weibull model in the analysis of survival data. Controlled Clinical Trials. 24 (6), 682–701. Saatavissa DOI: 10.1016/S0197-2456(03)00072-2

Chunsheng, G., Yunxia, B., Yuezong, Z., Weidong, M., Shiwei, F., Changzhi, L. & Zhiguo, L. 2009. A novel method for determing the lifetime of devices based on process-stress accelerated degradation test. Teoksessa 2009 16th IEEE International Symposium on the Physical and Failure Analysis of Integrated Circuits. 7.2009. Viitattu 31.1.2026. Saatavissa DOI: 10.1109/IPFA.2009.5232608

Collins, D.H., Huzurbazar, A.V. & Warr, R.L. 2024. Highly accelerated life testing (HALT): A review from a statistical perspective. WIREs Computational Statistics. 16 (4), e70000. Saatavissa DOI: 10.1002/wics.70000

Danielson, D., Marcyk, G., Babb, E. & Kudva, S. 1989. HAST applications: acceleration factors and results for VLSI components. Teoksessa 27th Annual Proceedings., International Reliability Physics Symposium. 4.1989. Viitattu 22.4.2026. Saatavissa DOI: 10.1109/RELPHY.1989.36331

Denson, W. 1998. The history of reliability prediction. IEEE Transactions on Reliability. 47 (3), SP321–SP328. Saatavissa DOI: 10.1109/24.740547

Farhadi, M., Vankayalapati, B.T. & Akin, B. 2023. Reliability Evaluation of SiC MOSFETs Under Realistic Power Cycling Tests. IEEE Power Electronics Magazine. 10 (2), 49–56. Saatavissa DOI: 10.1109/MPEL.2023.3271621

Gray, K.A. & Paschkewitz, J.J. 2016. Next Generation HALT and HASS: Robust Design of Electronics and Systems. Newark, UNITED KINGDOM: John Wiley & Sons, Incorporated. Viitattu 21.4.2026. Saatavissa http://ebookcentral.proquest.com/lib/lut/detail.action?docID=4451897

Gunn, J.E., Malik, S.K. & Mazumdar, P.M. 1981. Highly Accelerated Temperature and Humidity Stress Test Technique (HAST). IEEE. 1981. Viitattu 22.4.2026. Saatavissa DOI: 10.1109/IRPS.1981.362972

Haag, S. & Anderl, R. 2018. Digital twin – Proof of concept. Manufacturing Letters. 15, 64–66. Saatavissa DOI: 10.1016/j.mfglet.2018.02.006

He, Z., Wang, K., Zhu, M., Zhu, H. & Zhou, H.-M. 2026. Experimental Investigation into Ageing Mechanisms and Behavior Prediction Model of Flexible Electronic Substrates under Temperature–Humidity–Bending Conditions. IEEE Transactions on Device and Materials Reliability. 1–1. Saatavissa DOI: 10.1109/TDMR.2026.3674172

Hicks, M. & Pierpont, D. 2009. Application of Accelerated Testing and Statistical Lifetime Modeling to Membrane Electrode Assembly Development. Teoksessa Büchi, F.N., Inaba, M., & Schmidt, T.J.(toim.) Polymer Electrolyte Fuel Cell Durability. New York, NY: Springer. 385–396. Viitattu 31.1.2026. Saatavissa DOI: 10.1007/978-0-387-85536-3_19

Intertek. 2026. Step Stress Testing. Intertek. Viitattu 25.4.2026. Saatavissa https://www.intertek.com/performance-testing/step-stress/

Keil, F. & Hofmann, K. 2021. An Alternative Approach to Traditional Lifetime Testing Based on Comparative Studies and Survival Analysis. Teoksessa MikroSystemTechnik Congress 2021; Congress. 11.2021. Viitattu 31.1.2026. Saatavissa https://ieeexplore.ieee.org/document/9698360

Khanna, V.K. 2023. Extreme-temperature and harsh-environment electronics: physics, technology and applications. Second edition. Bristol England (Temple Circus, Temple Way, Bristol BS1 6HG, UK): IOP Publishing.

Kobayashi, T., Ariyoshi, H. & Masuda, A. 1978. Reliability Evaluation and Failure Analysis for Multilayer Ceramic Chip Capacitors. IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology. 1 (3), 316–324. Saatavissa DOI: 10.1109/TCHMT.1978.1135275

Lall, P., Pecht, M. & Hakim, E.B. 1995. Characterization of functional relationship between temperature and microelectronic reliability: Reliability physics of advanced electron devices. Microelectronics and reliability. 35 (3), 377–402.

Li, M. & Meeker, W.Q. 2014. Application of Bayesian Methods in Reliability Data Analyses. Journal of Quality Technology. 46 (1), 1–23. Saatavissa DOI: 10.1080/00224065.2014.11917951

O'Connor, P.D.T. 1983. Microelectronic System Reliability Prediction. IEEE Transactions on Reliability. R-32 (1), 9–13. Saatavissa DOI: 10.1109/TR.1983.5221461

Parii, D., Janssen, E., Tang, G., Kouzinopoulos, C. & Pietrasik, M. 2025. Predicting the Lifespan of Industrial Printheads with Survival Analysis. Teoksessa 2025 IEEE 8th International Conference on Industrial Cyber-Physical Systems (ICPS). 5.2025. Viitattu 27.2.2026. Saatavissa DOI: 10.1109/ICPS65515.2025.11087918

Ranjan, V. 2022. 85/85 THB Test Guide | Temperature Humidity Bias Testing Explained. Viitattu 22.4.2026. Saatavissa https://infinitalab.com/blog/85-85-test-temperature-humidity-bias-testing?srsltid=AfmBOorupkd3Gf-wx7k_YLMJM8LQYO_h0R4EI_X-boon7jO_cWvRshCt/

Sanchez, L.M. & Pan, R. 2009. Product robust design via accelerated degradation tests. Teoksessa 2009 Annual Reliability and Maintainability Symposium. 1.2009. Viitattu 13.4.2026. Saatavissa DOI: 10.1109/RAMS.2009.4914656

Singh, A. & Singh, S. 2025. Wireless Earphone Market Size, Share & Analysis Report, 2035. Viitattu 15.3.2026. Saatavissa https://www.gminsights.com/industry-analysis/wireless-earphone-market

Sondhi, K., Avuthu, S.G.R., Richstein, J., Fan, Z.H. & Nishida, T. 2020. Characterization of Bending, Crease, Aging, and Immersion Effects on Flexible Screen-Printed Silver Traces. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology. 10 (3), 444–456. Saatavissa DOI: 10.1109/TCPMT.2019.2944349

Sumaiya, O., Chakraborty, S., Mazumder, G.R., Maruf, M.A., Suhling, J.C. & Lall, P. 2025. Finite Element Analysis of the Thermal Cycling Performances of PBGA Assemblies Subjected to Various Prior Isothermal Aging Conditions. Teoksessa InterSoc. Conf. Therm. Thermomechanical Phenomena Electron. Syst. IEEE Computer Society. 2025. Saatavissa DOI: 10.1109/ITherm55376.2025.11235684

Wang, S., Li, Q., Wang, S., Zhang, W., Lu, C. & He, X. 2023. A mechanically adaptive polymer based triboelectric nanogenerator for long-life self-powered wearable electronics. European Polymer Journal. 188, 111937. Saatavissa DOI: 10.1016/j.eurpolymj.2023.111937

Zhang, Y. & Meeker, W.Q. 2006. Bayesian Methods for Planning Accelerated Life Tests. Technometrics. 48 (1), 49–60.