

**AIVOJEN ALFARYTMIN ROOLI MUISTINVARAISEN  
TARKKAAVUUDEN SUUNTAAMISESSA VISUAALISIIN  
PIIRTEISIIN**

Joonas Hyttinen  
Pro gradu -tutkielma  
Psykologian laitos  
Jyväskylän yliopisto  
Toukokuu 2024

HYTTINEN, JOONAS:

Aivojen alfarytmin rooli muistinvaraisen tarkkaavuuden suuntaamisessa visuaalisiin piirteisiin

Pro gradu -tutkielma, 41 s.

Ohjaaja: Tiina Parviainen

Psykologia

Toukokuu 2024

---

Aivojen rytmisen toiminnan, erityisesti alfarytmin, on tulkittu osallistuvan muistinvaraisen visuaalisen tarkkaavuuden toimintaan. Alfarytmin tarkka rooli sen toiminnassa ei kuitenkaan ole täysin selvä. Tässä tutkielmassa tutkittiin, osallistuuko alfarytmi mieleen painettuihin visuaalisiin piirteisiin kohdistuvan tarkkaavuuden suuntaamiseen. Aihetta tutkittiin *retro-cue*-muistivihjeitä hyödyntävällä koeasetelmalla. Vastaavanlaisten muistivihjeiden on viimeaikaisissa tutkimuksissa tulkittu olevan toimiva menetelmä tutkia muistinvaraista visuaalista tarkkaavuutta. Muistivihjeiden tarkoituksena oli ohjata koehenkilöitä suuntaamaan tarkkaavuuttaan mieleen painamiinsa visuaalisiin yksityiskohtiin ja siten helpottaa kokeessa annettujen muistitehtävien suorittamista. Alfarytmin tarkastelemiseksi koehenkilöiden aivotointia mitattiin magnetoenkefalografialla (MEG). Tutkielman aineisto kerättiin osana laajempaa MindEye-tutkimusta ja siihen sisältyi yhteensä 14 koehenkilöä.

Kokeen aikana koehenkilöt suorittivat muistitehtäviä, joissa heidän tuli painaa mieleensä kaksi eriväristä ja eri suuntiin osoittavaa palkkia. Pian palkkien esittämisen jälkeen koehenkilölle annettiin joko validi tai neutraali sanallinen muistivihje. Validin muistivihjeen tarkoituksena oli ohjata koehenkilöä suuntaamaan tarkkaavuuttaan tehtävän kannalta oleelliseen muistiainekseen, kun taas neutraaliin muistivihjeeseen tällaista tarkkaavuutta ohjaavaa lisätietoa ei sisältenyt. Muistinvaraisen tarkkaavuuden ja alfarytmin välisen yhteyden tutkimiseksi tarkasteltiin, esiintyikö alfarytmin voimakkuudessa eroja erityyppisten muistivihjeiden välillä. Tilastollisia eroja muistivihjeiden välillä tutkittiin toistomittausten varianssianalyysillä.

Tulosten perusteella tehtävässä annetulla muistivihjeellä ei ollut vaikutusta alfarytmin voimakkuuteen, mikä viittaa siihen, ettei alfarytmi suoraan osallistu yksittäisiin visuaalisiin piirteisiin kohdistuvan muistinvaraisen tarkkaavuuden suuntaamiseen. Näkemys ei ollut yhdenmukainen aikaisempien tutkimusten kanssa, joissa alfarytmin on tulkittu osallistuvan tarkkaavuuden kohteena olevien muistiedustusten valikointiin. Eroja saattavat kuitenkin selittää erot käytetyissä koeasetelmissa. Saatujen tulosten perusteella alfarytmi saattaa kohdentaa muistinvaraista visuaalista tarkkaavuutta mekanismeilla, joka ei perustu yksittäisten visuaalisten piirteiden erottelemiseen.

Avainsanat: sisäinen tarkkaavuus, visuaalinen tarkkaavuus, takaumavihje, MEG, alfarytmi

UNIVERSITY OF JYVÄSKYLÄ  
Department of Psychology

HYTTINEN, JOONAS:

The role of neural alpha oscillations in orienting attention to memorized visual features

Master's thesis, 41 p.

Supervisor: Tiina Parviainen

Psychology

May 2024

---

Neural alpha oscillations have been suggested to have an important role in memory based visual attention, but their exact function remains unclear. The aim of this thesis was to investigate the role of the alpha oscillations in orienting voluntary attention to visual features of memorized visual objects. This was studied using an experiment utilizing *retro-cues*, which have recently been suggested to be a practical method to study memory based visual attention. The purpose of these retroactively presented memory cues was to aid the participants in performing visual memory tasks by guiding their attention to task-relevant memory representations. To examine oscillatory activity during the experiment, the participants' neural activity was measured using magnetoencephalography (MEG). The data used was collected as a part of the MindEye research project and consisted of 14 participants in total.

During the experiment, the participants performed memory tasks requiring them to memorize two bars of differing color and orientation. Shortly after the presentation of the memory array, the participant was presented either a valid or a neutral linguistic memory cue. In the valid condition, the cue guided the participant to direct their attention to task-relevant information, whereas in the neutral condition, the cue didn't contain any task-relevant information. To investigate the relationship between internally focused attention and the alpha oscillations, differences in alpha power between each cue condition were examined. To statistically test for differences between each cue condition, repeated measurements analysis of variance was performed.

The results of the analyses indicated that the power of the alpha oscillations was not affected by the presented memory cue. Therefore, alpha power was not found to have a direct function in orienting attention to memorized visual features. Results were not consistent with previous studies, which have suggested that the brain modulates alpha power to focus attention on relevant visual details. This discrepancy may, however, be explained by differences in experimental designs between studies. Altogether, the current findings suggest that the alpha oscillations may direct internal visual attention using a mechanism that does not differentiate visual features from each other.

Keywords: internal attention, visual attention, retro-cue, MEG, alpha rhythm

## SISÄLLYS

1	JOHDANTO .....	4
1.1.	Visuaalinen työmuisti ja tarkkaavuus.....	5
1.2.	Sisäisen tarkkaavuuden tutkiminen .....	6
1.3.	Aivojen rytmien toiminta ja alfarytmi.....	7
1.4.	Tutkimuksen tarkoitus ja tutkimuskysymykset.....	9
2	MENETELMÄT.....	11
2.1.	Aineisto ja osallistujat .....	11
2.2.	Koeasetelma .....	12
2.3.	MEG-aineiston mittaaminen .....	14
2.4.	Aineiston esikäsittely .....	15
2.5.	Tilastollinen analyysi .....	15
3	TULOKSET.....	17
4	POHDINTA .....	23
4.1.	Alfarytmin vaikutusmekanismit sisäisen tarkkaavuuden suuntaamisessa .....	23
4.2.	Tutkimuksen vahvuudet .....	26
4.3.	Tutkimuksen rajoitukset .....	28
4.4.	Tulosten merkitys ja jatkotutkimusaiheita .....	29
4.5.	Johtopäätökset .....	31
	LÄHTEET.....	33

# 1 JOHDANTO

Aivojemme näköjärjestelmä käsittelee jatkuvasti valtavat määrät näönvaraista informaatiota, jota havaitsemme meitä ympäröivästä maailmasta. Aivojen visuaalinen järjestelmä muodostaa näiden havaintojen pohjalta integroituja kokonaisuuksia, representaatioita, joiden avulla tulkitsemme ja käsittelemme näkemäämme (Baddeley ym., 2011; Treisman, 1996). Tämän ansiosta pystymme erottelemaan toisistaan sekä erillisiä objekteja että yksittäisiä visuaalisia piirteitä, joista nämä objektit koostuvat. Näitä piirteitä voivat olla esimerkiksi väri, muoto, tekstuuri, suunta tai sijainti. Vaikka saatammekin helposti yliarvioida kykyämme hallita kaikkea tätä havainnoimaamme, pystymme kerrallaan huomioimaan tarkasti vain hyvin pienen osan kaikesta havainnoimastamme visuaalisesta informaatiosta. Emme välttämättä esimerkiksi huomaa ympäristössämme olevien asioiden muuttuvan, jos emme kiinnitä niihin erityistä huomiota.

Jotta pystyisimme toimimaan mahdollisimman tehokkaasti erilaisissa havainnointia vaativissa tilanteissa, meidän tulee kohdistaa huomiotamme kunkin tilanteen kannalta oleelliseen tietoon. Tämän kohdistamisen mahdollistavaa kognitiivista järjestelmää kutsutaan tarkkaavuudeksi, ja sen avulla pystymme erottamaan relevantit ja hyödyllisenä pidettävät ärsykkeet ylimääräisistä ja häiritsevistä ärsykkeistä (Alho ym., 2006). Perinteisen vertauskuvan mukaan tarkkaavuuden on ajateltu olevan ikään kuin eräänlainen kohdevalaisin, jolla huomiota on mahdollista kohdistaa kerrallaan vain hyvin rajatulle kiinnostuksen kohteena olevalle alueelle (Posner ym., 1980).

Tarkkaavuutta voidaan kohdistaa ulkoisten ärsykkeiden lisäksi myös mielen sisällä muodostettuihin sisäisiin representaatioihin. Näitä kahta eri tarkkaavuuden muotoa Chun ja kollegat (2011) kutsuvat tekemänsä jaottelun mukaisesti ulkoiseksi ja sisäiseksi tarkkaavuudeksi. Sisäisen tarkkaavuuden avulla pystymme esimerkiksi manipuloimaan jotakin kappaletta mielessämme, tai kohdistamaan huomiomme johonkin tarkkaan yksityiskohtaan jossakin mieleen painamassamme muistikuvassa. Sitä, miten aivot pystyvät näitä representaatioita muistista valikoimaan, ei kuitenkaan hyvin tunneta. Vaikka teoreettisina käsitteinä ulkoinen ja sisäinen tarkkaavuus ovatkin selvästi eroteltavissa toisistaan, ei toistaiseksi ole selvää käsitystä siitä, eroavatko näiden taustalla vaikuttavat aivomekanismit merkittävästi toisistaan.

Aikaisempien tarkkaavuuden toimintaa tarkastelevien tutkimusten perusteella vaikuttaisi vahvasti siltä, että erityisesti aivojen takaosissa esiintyvillä alfa-oskillaatioilla, eli niin sanotulla alfarytmillä, olisi merkittävä rooli tarkkaavuuden ylläpitämisessä riippumatta siitä, millaiseen tietoon tarkkaavuutta kohdistetaan (Poch ym., 2014; Rösner ym., 2020; Schneider ym., 2019).

Näiden oskillaatioiden tarkoitusta niin sisäisen kuin ulkoisenkaan tarkkaavuuden toiminnassa ei kuitenkaan täysin tunneta.

Tämän tutkimuksen tavoitteena oli tutkia aivojen rytmisen toiminnan roolia visuaalisiin piirteisiin kohdistuvan sisäisen tarkkaavuuden toiminnassa. Tätä tutkittiin tarkastelemalla, esiintyykö aivojen alfarytmien voimakkuudessa eroja sisäistä tarkkaavuutta ohjaavien *retro-cue*-muistivihjeiden välillä. Vastaavanlaisten muistivihjeiden on aikaisemmissa tutkimuksissa todettu soveltuvan sisäisen tarkkaavuuden tutkimiseen (Griffin & Nobre, 2003; Souza ym., 2016; Ye ym., 2021). Tutkimuksen aineistona käytetty aivodata kerättiin magnetoenkefalografiamittausten (MEG) avulla.

### 1.1. Visuaalinen työmuisti ja tarkkaavuus

Jotta visuaalisen tiedon käsitteleminen olisi ylipäänsä mahdollista, on aivojen pystyttävä tilapäisesti varastoimaan käsiteltävää tietoa. Tätä visuaalisen muistiaineksen muokkaamisen ja lyhytkestoisen varastoinnin mahdollistavaa muistijärjestelmää kutsutaan usein visuaaliseksi työmuistiksi (engl. *visual working memory*, VWM). Visuaalisen työmuistin ansiosta pystymme valikoimaan, palauttamaan mieleen ja prosessoimaan tilanteen kannalta olennaista visuaalista informaatiota silloinkin, kun se ei ole näönvaraisesti havaittavissa (Baddeley, 2010; Luck & Vogel, 1997). Mikäli tietoa ei aktiivisesti ylläpidetä työmuistissa, se voidaan tarvittaessa siirtää työmuistista edelleen pitkäkestoiseen muistiin myöhäisempää palautusta ja käsittelyä varten.

Visuaalisen työmuistin kapasiteetti on kuitenkin rajallinen, emmekä pysty samanaikaisesti ylläpitämään työmuistissamme kuin enintään noin neljää integroitua objektikonaisuutta (Cowan, 2001; Luck & Vogel, 1997). Lisäksi unohtamme helposti sellaiset näkemämme yksityiskohtat, joihin emme kiinnitä erityistä huomiota. Tämä korostuu varsinkin silloin, kun muistettavia yksityiskohtia on paljon, tai jos näemme muistettavat objektit vain hetkellisesti (Alvarez & Cavanagh, 2004; Eng ym., 2005; Sperling, 1960). Näiden rajoitteiden vuoksi visuaalisen työmuistin sisältöä tulee valikoida ja priorisoida suuntaamalla tarkkaavuutta mielenkiinnon kohteina oleviin ärsykkeisiin. Visuaalista työmuistia ja tarkkaavuutta voidaankin pitää keskeisinä näönvaraisen havainnoinnin ja tiedonkäsittelyn komponentteina, ja ne toimivat tiiviissä vuorovaikutuksessa keskenään.

Tiiviin vuorovaikutuksen vuoksi rajanveto visuaalisen työmuistin ja tarkkaavuuden välillä ei ole täysin selkeä, ja niiden aivoperustassa on tulkittu olevan huomattavaa päällekkäisyyttä (Awh

ym., 2006; Awh & Jonides, 2001; Olivers, 2008). Pääallekkäisyys korostuu varsinkin sisäisessä tarkkaavuudessa, joka edellyttää sekä työmuistin että tarkkaavuuden jatkuvaa vastavuoroista toimintaa. Suuntaamalla tarkkaavuuttaan ihminen tulee nimittäin samalla vaikuttaneeksi siihen, mitä tietoa työmuistissa käsitellään ja ylläpidetään (Hajonides ym., 2020; Liang ym., 2019; Schmidt ym., 2002). Tämä saattaa tarkoittaa sitä, että samalla kun työmuistiin varastoidaan uutta tilanteen kannalta oleellista tietoa, poistuu sieltä rajallisen kapasiteetin vuoksi lopulta sellainen muistiaines, jota ei enää tarvita. Toisaalta yhteys toimii myös toiseen suuntaan, sillä työmuistin sisältöä voidaan käyttää apuna tarkkaavuuden kohdistamisessa tilanteen kannalta hyödylliseen tietoon (Feldmann-Wüstefeld & Vogel, 2019; Kiyonaga ym., 2012; Li ym., 2021; Olivers ym., 2006). Yhtäläisyyksistä huolimatta visuaalinen työmuisti ja tarkkaavuus pystyvät kuitenkin toimimaan myös toisistaan riippumatta, mikä kertoo jaottelun näiden järjestelmien välillä olevan tarpeellinen (Hollingworth & Hwang, 2013; Hollingworth & Maxcey-Richard, 2013; LaRocque ym., 2016; Rerko ym., 2014).

## 1.2. Sisäisen tarkkaavuuden tutkiminen

Työmuistin ja sisäisen tarkkaavuuden välisen jaottelun selkeyttämiseksi tarvitaan lisää tietoa sisäisen tarkkaavuuden toimintamekanismeista, mutta ilmiön tutkimiseen sisältyvät omat haasteensa. Mielen sisäiset representaatiot eivät ole ulkoisesti havaittavissa, joten koetilanteessa on vaikea varmistua siitä, että koehenkilöt suuntaavat tarkkaavuuttaan samalla tavalla ja samantyyppisiin representaatioihin. Myös toimintojen ajoittaminen on haastavaa, koska pelkän havainnoinnin perusteella ei pystytä tarkasti arvioimaan, milloin koehenkilö esimerkiksi vaihtaa tarkkaavuutensa kohdetta. Vaikka nämä tekijät on mahdollista ottaa huomioon suunnitteleamalla tutkimuksessa käytettävä koeasetelma huolellisesti, ne voivat rajoittaa tutkimuksen perusteella tehtävien johtopäätösten tekemistä. Tämän vuoksi kiinnostuksen kohteena oleva ilmiö on pystyttävä koeasetelmissa rajaamaan tarpeeksi yksiselitteisesti.

Visuaalisten muistiedustusten osalta sisäisen tarkkaavuuden toimintaa on tutkittu paljon koeasetelmilla, joissa on hyödynnetty jälkikäteen annettuja *retro-cue*-muistivihjeitä (Souza & Oberauer, 2016). Suomeksi vastaavanlaisia vihjeitä voidaan kutsua esimerkiksi takaumavihjeiksi. Tyypillinen takaumavihjetehtävä on muistitehtävä, jossa koehenkilön tulee muistaa tehtävän alussa esitetystä muistijoukosta jokin tietty yksityiskohta. Kysytty yksityiskohta kuitenkin selviää koehenkilölle vasta vastauksen raportoinnin yhteydessä. Tehtävän helpottamiseksi koehenkilölle

annetaan takautuva muistivihje, jonka perusteella tämä pystyy etukäteen jättämään pois osan mieleen painamastaan informaatiosta. Vihje voi olla esimerkiksi nuoli, joka kertoo, mistä muistijoukon osasta jotakin yksityiskohtaa tullaan kysymään. Esitetyn muistivihjeen tarkoituksena on ohjata koehenkilöä suuntaamaan sisäistä tarkkaavuuttaan tehtävän kannalta oleelliseen muistiainekseen, minkä voidaan karkeasti olettaa vähentävän tehtävässä vaadittavaa muistikuormaa ja helpottavan tehtävän suorittamista.

Aiempien tutkimusten mukaan koehenkilöiden suorituskyky muistitehtävässä paranee, kun heille näytetään tehtävän aikana validi takaumavihje (Griffin & Nobre, 2003; Souza ym., 2016; Ye ym., 2021). Validilla vihjeellä tarkoitetaan siis vihjettä, joka antaa tehtävän suorittamisen kannalta hyödyllistä lisätietoa. Yksimielistä selitystä vihjeestä saatavalle hyödyille (engl. *retro-cue benefit*, RCB) ei ole, mutta hyödyn on tulkittu osoittavan, että sisäisen tarkkaavuuden avulla on mahdollista tukea työmuistin toimintaa (Lepsien ym., 2011; Makovski, 2012; Makovski & Pertzov, 2015; Rerko ym., 2014; Shepherdson ym., 2018; Sligte ym., 2008; Souza ym., 2014, 2016; Vandenbroucke ym., 2015; Ye ym., 2016). Toimintamekanismeja saattaakin olla useita, ja on mahdollista, että myös itse annetun vihjeen sisältö vaikuttaa siihen, kuinka aivot vihjettä käsittelevät.

Vaikka takautuvia muistivihjeitä hyödyntämällä voidaankin tarkastella sisäisen tarkkaavuuden aikaansaamia toiminnallisia vaikutuksia työmuistin toimintaan, ne eivät sellaisenaan anna mitään tietoa työmuistin tai sisäisen tarkkaavuuden taustalla vaikuttavista aivotoinninnoista. Niiden tutkimiseksi takaumavihjeitä hyödyntävää koeasetelmaa tulee käyttää yhdessä aivokuvantamismenetelmien kanssa. Aikaisemmissa sisäisen tarkkaavuuden ja takautuvan muistivihjeen neuraalista perustaa tarkastelevissa tutkimuksissa on hyödynnetty pääosin EEG- eli elektroenkefalografiamittauksia. Tarkastelun kohteena ovat usein olleet erilaiset aivoissa esiintyvät neuraaliset oskillaatiot ja niissä tapahtuvat muutokset. Näistä oskillaatioista erityisen mielenkiintoisena voidaan pitää niin kutsuttua alfarytmiä, jolla on tulkittu olevan tärkeä rooli sekä visuaalisen tiedon prosessoinnissa että näköärsykkeisiin kohdistuvan tarkkaavuuden ylläpitämisessä (Hari & Salmelin, 1997).

### **1.3. Aivojen rytmien toiminta ja alfarytmi**

Aivojen toiminnallisuus perustuu hermosolupopulaatioiden sähkökemialliseen toimintaan, jota on mahdollista mitata EEG:n tai MEG:n avulla. Hermosolupopulaatioiden jatkuva toiminta saa



aikaan synkronoitua ja jatkuvasti toistuvaa aaltomaista aktiviteettia, jota kutsutaan rytmiseksi tai oskillatoriseksi toiminnaksi. Yksi tapa tutkia, miten aivot toimivat, on tarkastella tätä toimintaa ja sen voimakkuuden vaihtelua. Erityisesti ajallisiin muutoksiin viitattaessa puhutaan rytmisen toiminnan modulaatiosta.

Aivojen rytmistä toimintaa voidaan jaotella useisiin toisistaan erillisiin oskillatorisiin rytmeihin, joiden on perinteisesti ajateltu heijastelevan ihmisen vireystilaa ja edustavan erilaisten tiedonkäsittelyprosessien toimintaa. Visuaalisen tarkkaavuuden kannalta erityisen kiinnostavana voidaan pitää aivojen takaosissa 8–13 Hz taajuuskaistalla havaittavaa rytmistä aktiviteettia, jota kutsutaan alfarytmiksi. Perinteisesti alfarytmin on tulkittu heijastavan näköjärjestelmän lepotilaa, mitä on perusteltu sillä, että yksitoikkoiset ärsykkeet, vähäinen valon määrä ja silmien sulkeminen saavat alfarytmin tyypillisesti voimistumaan (Hari & Puce, 2017). Tämän voimistumisen on ajateltu olevan merkki siitä, etteivät aivot aktiivisesti käsittele visuaalista informaatiota. Nykyisin tämä näkemys on kuitenkin vanhentunut, eivätkä uudemmat tutkimukset tue sitä.

Nykyaikaisen inhibitiio-hypoteesin mukaan alfarytmi heijastaakin aisteista tulevan tiedon priorisointia ja aktiivista suodattamista (ElShafei ym., 2022; Gutteling ym., 2022; Händel ym., 2011; Klimesch ym., 2007; Ter Huurne ym., 2013). Tämän tulkinnan mukaan alfarytmissä tapahtuvat muutokset ovat siis seurausta enemmänkin tarkkaavuuden kuin näköjärjestelmän toiminnasta. Tätä näkemystä vahvistavat havainnot, joiden mukaan alfarytmin modulaatiota esiintyy myös ennen ärsykkeen ilmaantumista silloin, kun koehenkilöt osaavat etukäteen odottaa ärsykkeen ilmaantumista (Sauseng ym., 2005; Worden ym., 2000; Zhao ym., 2023). Tämä tutkimustieto tukee käsitystä siitä, että voimistuva alfarytmi on osoitus enemmänkin aktiivisesta toiminnasta kuin aivojen passiivisuudesta.

Ulkoisen visuaalisen tarkkaavuuden toimintaa tarkastelevissa tutkimuksissa on havaittu, että kun tarkkaavuutta kohdistetaan vain toiselle puolelle näkökenttää, seuraa asymmetrisesti eri aivopuoliskoissa tapahtuvaa alfarytmin modulaatiota (Doesburg ym., 2016; Ikkai ym., 2016; Sauseng ym., 2005). Toisin sanoen muutokset alfarytmissä lateralisoituvat toiselle aivopuoliskolle riippuen siitä, kummalle puolelle näkökenttää tarkkaavuutta kohdistetaan. Tämän seurauksena alfarytmi on tyypillisesti voimakkaampaa siinä aivopuoliskossa, joka on ipsilateraalinen eli samalla puolella tarkkaavuuden kohteena olevaan ärsykkeeseen nähden. Tämän on tulkittu tarkoittavan, että alfarytmin voimakkuutta säätelemällä aivot kohdistavat tarkkaavuuden suuntaamiseen vaadittavia resursseja tarkoituksenmukaiseen toimintaan (Doesburg ym., 2016; Händel ym., 2011; Jensen & Mazaheri, 2010; Klimesch ym., 2007). Tämän perusteella alfarytmin voimakkuuteen saattaa siis olla koodattuna tietoa tarkkaavuuden kohteena olevien ärsykkeiden sijainneista näkökentässä.

Ulkoisten ärsykkeiden lisäksi vastaavanlaista lateralisaatiota voidaan havaita myös silloin, kun tarkkaavuutta kohdistetaan johonkin valikoituun sijaintiin mielen sisäisissä representaatioissa (Myers ym., 2015; Poch ym., 2014; Rösner ym., 2020). Tämä antaa viitteitä siitä, että aivot kohdistavat tarkkaavuutta samalla tavalla riippumatta siitä, kohdistetaanko tarkkaavuutta ulkoisesti vai sisäisesti. Vaikka näiden tutkimusten perusteella alfarytmin voidaankin olettaa osallistuvan sisäisen tarkkaavuuden suuntaamiseen, ei ole selvää, millaisten mekanismien toimintaa alfarytmin modulaatio oikeastaan heijastelee. Epävarmaa on erityisesti, vaikuttavatko alfarytmin voimakkuuteen sijainnin lisäksi myös tarkkaavuuden kohteena olevien muistiedustusten muut ominaisuudet. Asian selventämiseksi aihetta tuleekin tutkia enemmän sellaisilla koeasetelmilla, joissa sijainninvaraisen tiedon vaikutukset alfarytmiin on huomioitu.

#### **1.4. Tutkimuksen tarkoitus ja tutkimuskysymykset**

Tämän tutkimuksen tavoitteena oli tutkia visuaaliseen muistiaineeseen kohdistuvan tarkkaavuuden neuraalista perustaa ja siten tuoda uutta tietoa sisäisen tarkkaavuuden toiminnasta. Tarkoituksena oli selvittää, osallistuuko alfarytmi visuaalisiin piirteisiin kohdistuvan sisäisen tarkkaavuuden suuntaamiseen. Tätä tutkittiin sisäistä tarkkaavuutta vaativan visuaalisen muistitehtävän avulla. Toisin kuin useimmissa aikaisemmissa sisäisen tarkkaavuuden toimintaa tarkastelevissa tutkimuksissa, tämän tutkimuksen aineisto kerättiin EEG:n sijasta MEG:n avulla. MEG mahdollistaa EEG:tä tarkemman signaalin paikannuksen, minkä vuoksi sen toivottiin antavan yksityiskohtaisempaa tietoa aivojen toiminnasta. Näin pystyttiin aiempaa tarkemmin tutkimaan, missä aivojen osissa alfarytmin muutoksia mahdollisesti tapahtui.

Tutkimuksen toteuttamiseen käytettiin takautuvia visuaalisia muistivihjeitä hyödyntävää koeasetelmaa, jossa koehenkilöiden tarkkaavuutta ohjattiin kahden erilaisen ulottuvuuteen perustuvan muistivihjeen avulla. Vastaavanlaisia muistivihjeitä on aikaisemmin tutkittu vähän, eivätkä aikaisemmat tutkimustulokset ole olleet keskenään yhdenmukaisia. Vastaavanlaisten MEG-tutkimusten vähäisyyden vuoksi aihetta tutkittiin eksploratiivisella tutkimusotteella.

Tutkimuksen tarkoituksena oli vastata seuraaviin tutkimuskysymyksiin:

1. Vaikuttaako tarkkaavuutta ohjaava muistivihje eri tavoin alfarytmin voimakkuuteen muistitehtävän aikana kuin vihje, johon ei sisälly tarkkaavuutta ohjaavaa lisätietoa?
2. Esiintyykö alfarytmin voimakkuudessa eroja tehtävän aikana sen mukaan, ohjataan tarkkaavuutta mieleen painettujen kappaleiden väreihin vai niiden suuntiin?
3. Vaikuttaako muistivihjeellä ohjattu tarkkaavuuden suuntaaminen alfarytmin voimakkuuteen eri tavoin aivojen päälaki- ja takaraivoalueilla?

Aikaisempien tutkimusten perusteella alfarytmi heijastaa muistinvaraisen tarkkaavuuden kohdentamiseen liittyvää aivotoimintaa. Tämä on osoitettu vertaamalla validia muistivihjettä neutraaliin muistivihjeeseen, joka ei sisällä tehtävän suorittamisen kannalta hyödyllistä tietoa (Poch ym., 2014). Erityisesti ulottuvuuteen perustuvan muistivihjeen osalta tämän eron suunnasta ei kuitenkaan ole yksimielisyyttä (Hajonides ym., 2020; Li ym., 2023; Poch ym., 2017; Schneider ym., 2019). Tämän vuoksi oletuksena oli, että alfarytmin voimakkuudessa esiintyy eroja validin ja neutraalin muistivihjeen välillä, mutta eron suunnasta ei tehty oletuksia.

Toiseksi haluttiin vertailla eroja erityyppisten ulottuvuuteen perustuvien muistivihjeiden välillä. Tässä tutkimuksessa käytetyt vihjeet ohjasivat tarkkaavuutta joko muistiin painettujen kappaleiden väreihin tai niiden suuntiin. Aikaisempien tutkimustulosten mukaan tarkkaavuutta voidaan ohjata ulottuvuuteen perustuvalla muistivihjeellä vihjetyypistä riippumatta (Goldenhaus-Manning ym., 2023; Hajonides ym., 2020; Liu ym., 2023; Poch ym., 2017; Ye ym., 2016). Erilaisten vihjetyyppien välisiä eroja aivojen toiminnassa ei ole kuitenkaan aikaisemmin tutkittu. Sen vuoksi oletuksia vihjetyyppien välisistä eroista alfarytmissä ei tehty.

Lisäksi haluttiin tutkia, vaikuttaako muistivihje ja sitä seurannut sisäisen tarkkaavuuden suuntaaminen alfarytmin voimakkuuteen eri tavoin eri aivoalueilla. Eroja tarkasteltiin päälaki- ja takaraivoalueiden välillä, koska erityisesti alueilla esiintyvän alfarytmin on tulkittu osallistuvan sisäisen tarkkaavuuden toimintaan (Hajonides ym., 2020; Hari & Puce, 2017; Poch ym., 2014). Aivoalueiden välisiä eroja ei vastaavanlaisella koeasetelmalla ole kuitenkaan aikaisemmin tutkittu, joten mahdollisesta erosta ei tehty oletuksia.

## 2 MENETELMÄT

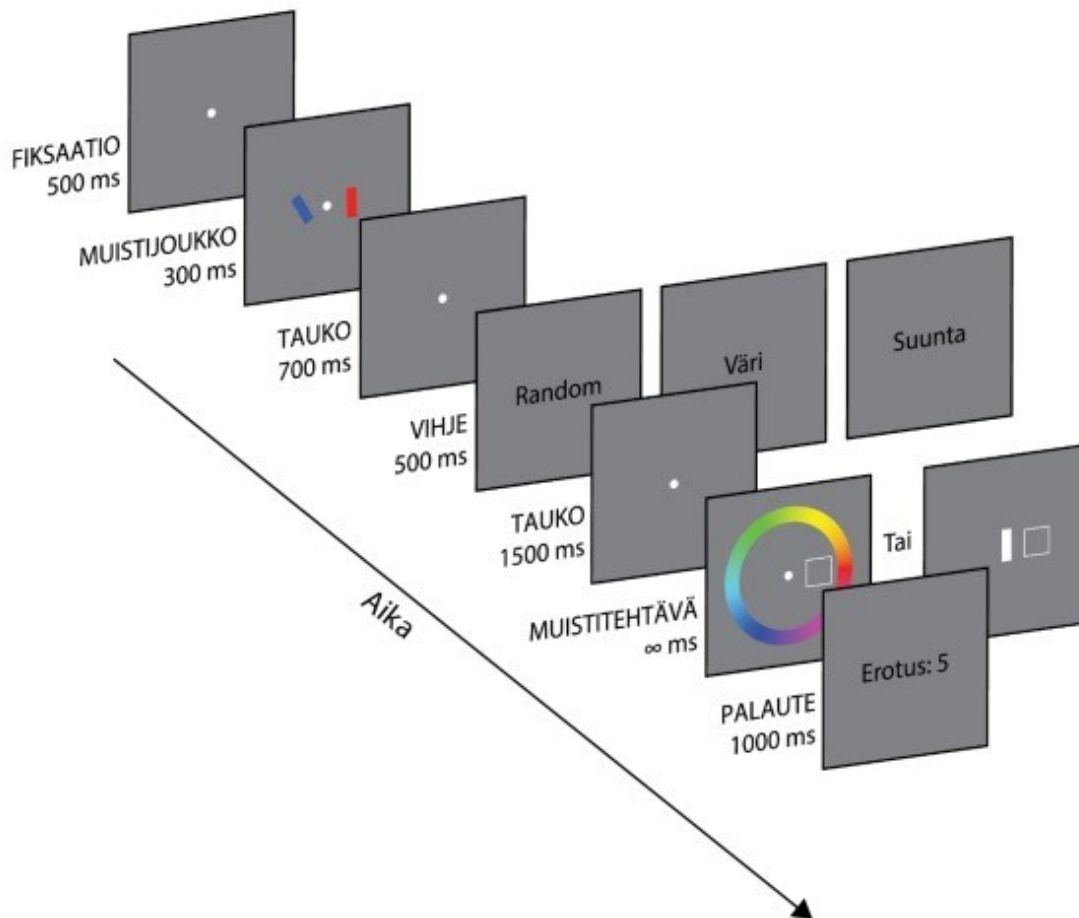
### 2.1. Aineisto ja osallistujat

Tämän tutkielman aineisto kerättiin osana laajempaa sisäisen tarkkaavuuden toimintaa tarkastelevan MindEye-tutkimushankkeen aineistonkeruuta. Aineisto kerättiin Jyväskylän monitieteisessä aivotutkimuskeskuksessa syksyllä 2022 ja keväällä 2023. Tutkimukseen osallistui kuusitoista koehenkilöä, joiden aivotoimintaa mitattiin MEG-mittausten avulla. Aineistosta jätettiin alustavien tarkastelujen perusteella pois 2 koehenkilöä (1 nainen ja 1 mies), joiden mittausaineistossa oli korjaustoimenpiteistä huolimatta havaittavissa runsasta häiriötä. Lopulliseen tutkimusaineistoon sisältyi kaiken kaikkiaan siis 14 koehenkilöä, joista 7 oli miehiä ja 7 naisia. Mittausten aikana koehenkilöt suorittivat takautuvia muistivihjeitä hyödyntäviä visuaalisia muistitehtäviä.

Tutkimuksen koehenkilöt olivat MEG-tutkimuksesta kiinnostuneita 22–48-vuotiaita henkilöitä, jotka rekrytoitiin olemassa olevien kontaktien, sosiaalisen median ja Jyväskylän yliopiston tarjoamien tiedotuskanavien välityksellä. Näitä kanavia olivat esimerkiksi sähköpostilistat ja yliopiston verkkosivuilla julkaistut tiedotteet. MEG-laitteen käyttöön liittyvien rajoitusten vuoksi kriteerinä tutkimukseen osallistumiselle oli, ettei osallistujien kehossa saanut olla metallia tai muita magneettista häiriötä aiheuttavia laitteita tai implantteja. Muita kriteerejä tutkimukseen osallistumiselle olivat 18–55 vuoden ikä sekä normaali tai normaaliksi korjattu näkö ja kuulo. Osallistujilla ei myöskään saanut olla psykiatrisia tai neurologisia diagnooseja eikä keskushermostoon vaikuttavaa lääkitystä. Näillä kriteereillä pyrittiin minimoimaan ulkoisten tekijöiden vaikutukset tutkimustuloksiin ja varmistamaan, että koehenkilöt pystyivät noudattamaan kokeen aikana annettuja ohjeita.

Tutkimuksen tutkimussuunnitelma oli saanut puoltavan lausunnon Jyväskylän yliopiston eettiseltä toimikunnalta, ja tutkimuksessa noudatettiin Helsingin julistuksen mukaisia eettisiä periaatteita. Ennen varsinaisten mittausten suorittamista koehenkilöt täyttivät suostumuslomakkeen, jolla he osoittivat osallistuvansa tutkimukseen vapaaehtoisesti.

## 2.2. Koeasetelma



KUVA 1. Muistitehtävän rakenne. Fiksaatoruudun jälkeen koehenkilölle esitettiin hetkellisesti palkit, jotka koehenkilön tuli painaa mieleensä. Tätä seurasi lyhyt tauko, jonka jälkeen koehenkilö sai joko validin ("Väri" tai "Suunta") tai neutraalin ("Random") muistivihjeen. Muistivihjettä seurasi pidempi tauko, jonka jälkeen koehenkilön tuli antaa vastaus annettuun muistitehtävään. Lopuksi koehenkilö sai palautetta antamastaan vastauksesta.

Kokeessa käytettiin kahdentyyppisiä muistitehtäviä, jotka erosivat toisistaan sen mukaan, millaiseen tietoon koehenkilön tarkkaavuutta tehtävän aikana ohjattiin. Kappaleeseen perustuvassa tehtävätyypissä tarkkaavuutta ohjattiin johonkin tiettyyn muistijoukossa esitettyyn kappaleeseen, kun taas ulottuvuuteen perustuvassa tehtävätyypissä tarkkaavuutta ohjattiin johonkin useassa kappaleessa esiintyneeseen visuaaliseen piirteeseen, kuten kappaleiden väreihin. Tässä tutkimuksessa kuitenkin tarkasteltiin ainoastaan ulottuvuuteen liittyvää aineistoa, joten kappaleeseen perustuvan tehtävän toimintaa ei tässä tarkemmin kuvata. Kokeen aikana kerätyn aineiston tarkoituksena oli kuvata aivojen alfarytmissä tapahtuvia muutoksia silloin, kun

koehenkilöt kohdistivat tarkkaavuuttaan muistitehtävissä mieleen painamiinsa visuaalisiin piirteisiin. Kokeessa käytetyn tehtävän rakennetta ja etenemistä on havainnollistettu kuvassa 1.

Tehtävä alkoi 500ms kestäneestä fiksaatoruudusta, jossa koehenkilön tuli kohdistaa katseensa ruudun keskellä olevaan fiksaatiopisteeseen. Tämän jälkeen koehenkilölle esitettiin mieleen painettava muistijoukko 300ms ajan. Muistijoukko koostui kahdesta erivärisestä ja eri suuntiin osoittavasta palkista (pituus  $1.1^\circ$ , korkeus  $0.4^\circ$ ). Palkkien ominaisuudet arvottiin satunnaisesti 360 väri vaihtoehdon ja  $1^\circ - 180^\circ$  astekulman joukosta. Palkit sijaitsivat eri puolilla näkökenttää ja niiden väliin jäävä alue sijaitsi keskellä näkökenttää. Käytetyt näköärsykkeet vastasivat Yen ja kollegoiden (2021) tutkimuksessa käytettyjä ärsykeitä.

Muistijoukon esittämistä seurasi 700ms tauko, jonka jälkeen koehenkilölle annettiin muistivihje. Vihjettä näytettiin koehenkilölle 500ms ajan. Mikäli tehtävän aikana näytetty vihje oli validi, näytön keskelle ilmestyi vihjeen ilmaantuessa joko teksti ”Väri” tai ”Suunta”. Näiden sanojen tarkoituksena oli ohjata koehenkilöä kohdistamaan tarkkaavuuttaan joko mieleen painettujen palkkien väreihin tai niiden suuntiin. Käytännössä koehenkilö pystyi siis jättämään huomiotta sen ominaisuuden, jota vihjeessä ei mainittu. Mikäli vihje oli neutraali, koehenkilölle näytettiin puolestaan teksti ”Random”, eikä vihje tällöin antanut mitään muistettavaan ominaisuuteen liittyvää lisätietoa. Tällöin koehenkilön tuli edelleen pitää mielessään palkkien molemmat ominaisuudet. Tulosten yhdenmukaistamiseksi koehenkilöitä ohjeistettiin käyttämään validia muistivihjettä apuna tehtävän suorittamisessa.

Muistivihjeen ja sitä seuranneen 1500ms tauon jälkeen koehenkilölle esitettiin joko väriympyrä (sisempi säde  $5.8^\circ$ , paksuus  $2.2^\circ$ ) tai valkoinen palkki ( $1.1^\circ \times 0.4^\circ$ ), jonka perusteella tämän tuli antaa vastaus kysytyyn ominaisuuteen. Mikäli tehtävässä annettu muistivihje oli ollut neutraali, koehenkilö sai vasta tässä vaiheessa tietää, kumpi ominaisuuksista oli ollut tehtävän kannalta oleellinen. Samalla koehenkilölle näytettiin myös valkoinen neliö ( $1.2^\circ \times 1.2^\circ$ ), jonka sijainnin perusteella tämä sai tietää, kumman tehtävässä esitetyn palkin ominaisuutta tehtävässä kysyttiin. Lopuksi koehenkilö raportoi vastauksensa valitsemalla sen kuvaruudulta tehtävän suorittamista varten annetun hiiren avulla.

Väriin liittyvä vastaus raportointiin valitsemalla väriympyrästä oikea väri hiiren kursorilla. Suuntaan liittyvä vastaus annettiin kääntämällä näytön keskellä olevaa palkkia siihen suuntaan, mihin myös mieleen painettava palkki oli osoittanut. Raportointivaiheessa ei ollut erillistä aikarajaa, vaan koehenkilö sai harkita vastaustaan niin pitkään kuin koki tarpeelliseksi. Annettuaan vastauksensa koehenkilölle annettiin palautteena erotusluku, joka kertoi, kuinka lähellä oikeaa annettu vastaus oli ollut.

Kokeeseen sisältyi yhteensä kaiken kaikkiaan 240 trialia eli muistijoukon, vihjeen ja muistitehtävän muodostamaa tehtäväkokonaisuutta, joiden suorittaminen kesti koehenkilön vastausnopeuden mukaan noin 45–60 minuuttia. Kaikki trialit jaettiin neljään noin 10 minuuttia kestävään osioon siten, että kutakin osiota seurasi lyhyt tauko. Ennen varsinaisen tehtäväsarjan aloittamista koehenkilöt saivat harjoitella tehtävän suorittamista, jotta varmistuttiin siitä, että koehenkilöt ymmärsivät tehtävänannon ja hallitsivat tehtävän suorittamiseen vaadittavien välineiden käytön.

### **2.3. MEG-aineiston mittaaminen**

Koehenkilöiden aivoaktiivisuutta mitattiin 306-kanavaisella Elekta Neuromag TRIUX -järjestelmällä (Megin Oy, Helsinki, Suomi). Kanavat koostuivat 102 magnetometri-sensorista ja 204 gradiometri-sensorista. Aineisto kerättiin käyttämällä 1000 Hz:n keräystaajuutta, 330 Hz:n alipäästösuodatusta ja 0.03 Hz:n ylipäästösuodatusta. Mittaukset suoritettiin magneettisesti suojatussa ja eristetyssä huoneessa (VacuumSchmelze GmbH, Hanau, Saksa). Mittausten aikana koehenkilö istui kypäränmallisessa mittalaitteessa ja suoritti tehtäviä, jotka heijastettiin projektorilla koehenkilön edessä olevalle näytölle käyttäen Presentation -ohjelmistoa. Näyttö sijaitsi koehenkilön edessä metrin etäisyydellä. Tehtävien suorittamista varten koehenkilöllä oli käytössään MEG-laitteen kanssa yhteensopiva optinen hiiri.

Ennen mittauksia koehenkilöiden pään muoto digitoitiin käyttämällä Polhemus Fastrak 3D Digitizer and Quad Sensor Motion Tracker -laitetta (Polhemus, Vermont, USA). Digitoinnin toteuttamiseksi koehenkilöiden päänahalle asetettiin viisi pään sijaintia ja suuntaa mittaavaa HPI-kelaa (engl. *head position indicator*). Lisäksi koehenkilöiden silmänliikkeitä ja sydämensykettä mitattiin elektro-okulografian (EOG) ja elektrokardiografian (EKG) avulla, jotta näistä aiheutuva häiriösignaali pystyttiin huomioimaan aineistoa analysoitaessa. EOG toteutettiin kahdella erillisellä elektrodiparilla pysty- ja vaakasuorasti silmänräpäysten erottelemiseksi muista silmänliikkeistä.

## 2.4. Aineiston esikäsittely

Ennen varsinaisen analyysin toteuttamista mittausaineistosta poistettiin pään ulkopuolelta tulleet häiriösignaalit ja vakioitiin koehenkilöiden pään sijainnit käyttämällä MaxFilter-ohjelmistoa. Näiden valmistelujen jälkeen mittausaineistolle tehtävät jälkikäsittelyt suoritettiin käyttämällä Jyväskylän yliopiston Meggie-ohjelmaa, joka mahdollisti neurofysiologisen aineiston analysointiin tarkoitetun MNE-python-ohjelmakirjaston käyttämisen graafisen käyttöliittymän avulla (Heinilä & Parviainen, 2022). Silmänliikkeistä ja sydämensykkeestä aiheutuva häiriösignaali minimoitiin aineistossa ICA-menetelmän avulla (engl. *independent component analysis*). Lisäksi aineistolle tehtiin 40 Hz:n alipäästösuodatus ja 0.1 Hz:n ylipäästösuodatus.

Jatkuvasta aivosignaalista muodostettiin kokeessa esitettyjen trialien pohjalta kullekin muistivihjeärsykkeelle erilliset ajanjaksot (engl. *epoch*). Ajanjaksojen perusteella eri aivoalueille laskettiin koehenkilöiden keskiarvoa havainnollistavat aika-taajuuskuvaajat (engl. *time frequency representation, TFR*), joiden perusteella voitiin arvioida aivojen rytmisen toiminnan muutoksia yleisellä tasolla. Kuvaajat laskettiin taajuusvälille 5–30 Hz ja aikavälille -1000ms – 2500ms siten, että aikavälin nollakohta ajoittui tehtävässä annetun muistivihjeen ilmaantumishetkeen. Aivotoiminnan perustasoa kuvaava kontrolliajanjakso (engl. *baseline*) sijoitettiin aikavälille -250ms – 0ms. Tilastollista tarkastelua varten jokaiselle koehenkilölle laskettiin signaalin voimakkuuseroja kuvaavat TSE-aikasarjat (engl. *temporal spectral evolution*) vastaaville ajanjaksoille. Koska tavoitteena oli tarkastella nimenomaan alfarytmissä tapahtuvia muutoksia, rajattiin TSE kattamaan 8–13 Hz taajuuskaistalla tapahtuvat muutokset. Arvojen laskemiseen käytettiin gradiometri-sensoreilla mitattuja arvoja, koska niiden arveltiin olevan signaalin paikannuksen kannalta tarkempia. Näin pystyttiin tarkemmin arvioimaan signaalinlähteet suoraan mittausaineistosta ilman lähdemallinnusta.

## 2.5. Tilastollinen analyysi

Tilastollista analyysia varten TSE-aikasarjoista saatua aineistoa käsiteltiin Microsoft Excel -taulukkolaskentaohjelmalla. Aluksi aineistoa rajattiin niin, että lopullisessa aineistossa huomioitiin vain muistivihjeen esittämisen jälkeen tapahtuvat alfarytmien muutokset. Aineistoon siis jätettiin ne arvot, jotka sijoittuivat aikavälille 1000ms – 2000ms muistivihjeen esittämisestä.



Aikaväli rajattiin niin, että suoraan visuaalisten vihjeärsykkeiden käsittelemisestä mahdollisesti aiheutuvat rytmisen toiminnan muutokset jäivät aikavälin ulkopuolelle. Jäljelle jääneistä arvoista laskettiin kullekin koehenkilölle oskillaatioiden amplitudien maksimi-arvot. Testaamisen ja tulosten tulkinnan helpottamiseksi aineistossa esiintyvät arvot kerrottiin lisäksi luvulla  $10^{22}$ . Varsinaiset tilastolliset analyysit suoritettiin näiden arvojen pohjalta käyttämällä IBM SPSS Statistics 28 -ohjelmistoa.

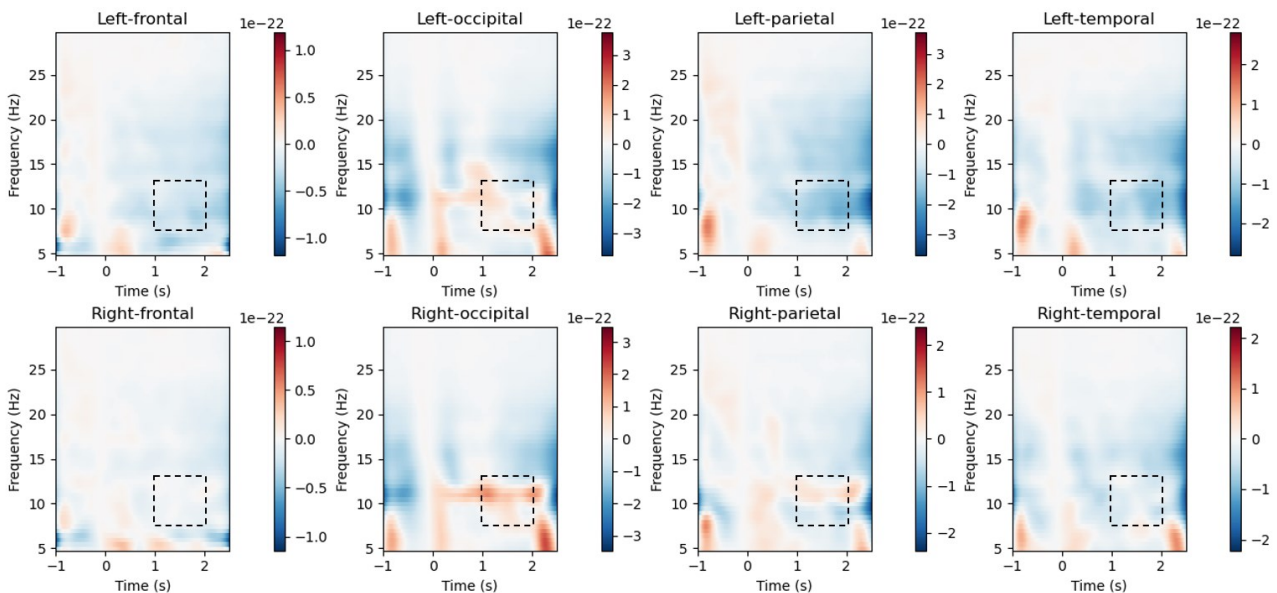
Aineiston tilastolliseen testaamiseen käytettiin toistomittausten varianssianalyysia (engl. *repeated measures analysis of variance*), jolla tutkittiin muistivihjetyyppien välisiä eroja alfarytmien voimakkuudessa aivoalueittain. Samalla analyysilla tarkasteltiin eroa validin ja neutraalin vihjeen välillä (tutkimuskysymys 1), väriin ja suuntaan perustuvan vihjeen välillä (tutkimuskysymys 2) ja valikoitujen aivoalueiden välillä (tutkimuskysymys 3). Malliin sisällytettiin kolme faktorilla, joita olivat aivopuolisko, aivoalue ja ärsyketyyppi (eli muistivihje). Käytetyt faktorit muodostettiin siten, että aivopuoliskoon sisällytettiin kaksi tasoa (vasen, oikea), aivoalueeseen kaksi tasoa (päälaki, takaraivo) ja ärsyketyyppiin kolme tasoa (random, väri, suunta). Sfäärisysoletusten testaamiseen käytettiin Mauchlyn sfäärisyystestiä. Efektikokoja tutkittiin osittais-etan neliön avulla. Ennen analyysin toteuttamista aineiston normaalijakautuneisuutta tarkasteltiin silmämääräisesti histogrammeista ja box plot-kuvioista sekä laskennallisesti Kolmogorov-Smirnovin ja Shapiro-Wilkin testeillä.

Kaikki aineistossa esiintyneet muuttujat eivät täyttäneet normaalijakautuneisuuden osalta toistomittausten varianssianalyysin edellyttämiä lähtöoletuksia, mikä saattoi vääristää analyysilla saatuja tuloksia. Tämä lisäsi erityisesti riskiä tyyppin I virheestä, eli paikkansapitävien nollahypoteesien hylkäämisestä (Kogan, 1948). Tämän vuoksi harkittiin tarkempien jatkotarkastelujen toteuttamista, joissa muuttujien välisiä eroja olisi tarkasteltu lisäksi muuttujien keskinäiseen järjestykseen perustuvilla parametrittömillä testeillä. Kiinnostuksen kohteena olevan faktorin (ärsyketyypin) osalta tilastollisissa testeissä ei kuitenkaan havaittu tilastollisesti merkitseviä eroja, joten vinouman aiheuttamaa vaaraa tyyppin I virheestä ei ollut. Saatujen tulosten katsottiin täten kuvanneen aineistossa esiintyneitä eroja riittäväällä tarkkuudella, eikä parametrittömien testien nähty antavan tutkimukselle lisäarvoa.

### 3 TULOKSET

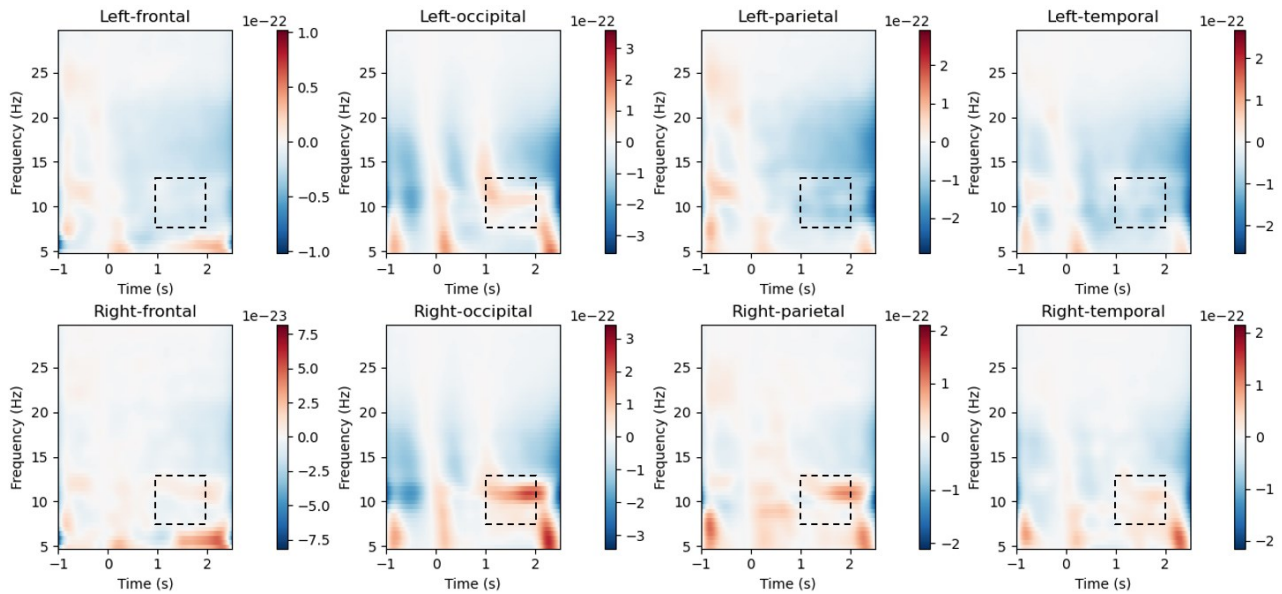
Ennen tilastollisten testien suorittamista aineistoa tarkasteltiin ensin silmämääräisesti aivojen rytmisessä toiminnassa tapahtuvien yksityiskohtaisten muutosten selvittämiseksi. Mittausaineiston pohjalta muodostettujen TFR-kuvaajien visuaalisessa tarkastelussa havaittiin alfataajuuksilla (8–13Hz) tapahtuvien oskillaatioiden mahdollisesti poikkeavan muistiaineksen ylläpitämisvaiheen aikana sen mukaan, näytettiinkö tehtävässä neutraali vai validi muistivihje. Mahdollisia eroja oli nähtävissä erityisesti aivojen takaosissa ja oikealla päälakialueella (left-occipital, right-occipital ja right-parietal). Havainnot tukivat aikaisempia tulkintoja, joiden mukaan erityisesti takaraivo- ja päälakialueilla esiintyvä alfarytmi osallistuu sisäisen tarkkaavuuden toimintaan. Neutraalissa tilanteessa modulaatio vaikutti olevan voimakkaampaa pian muistivihjeen esittämisen jälkeen (ks. Kuva 2), kun taas validissa tilanteessa modulaatio mahdollisesti voimistui myöhemmin (ks. Kuva 3). Silmämääräisesti eroja oli havaittavissa myös silloin, kun tarkasteltiin ainoastaan väriin perustuvan (ks. Kuva 4) ja suuntaan perustuvan (ks. Kuva 5) muistivihjeen aikaansaamia muutoksia. Etenkin väriin perustuva ärsyke vaikutti saavan aikaan alfarytmien voimistumista myös oikealla ohimoalueella (right-temporal) (ks. Kuva 4).

#### Neutraali ärsyke (random)



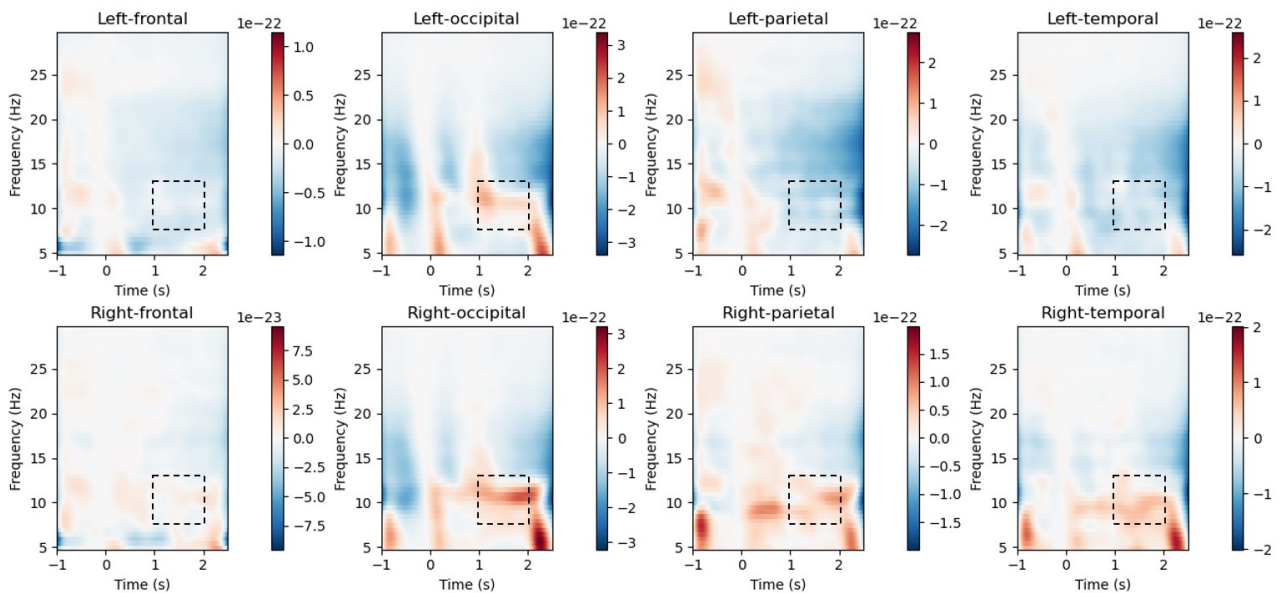
KUVA 2. TFR-kuvaajat 5–30 Hz taajuuksilla aivoalueittain koetilanteessa, jossa on esitetty neutraali muistivihje ajanhetkellä 0 s. Tarkasteltu aika- ja taajuusväli on rajattu katkoviivalla. Kuvaajat esittävät kaikilta koehenkilöiltä laskettuja keskiarvoja. Huom. Kuvaajien voimakkuusskaalat ovat toisistaan poikkeavia.

## Validi ärsyke (suunta ja väri)



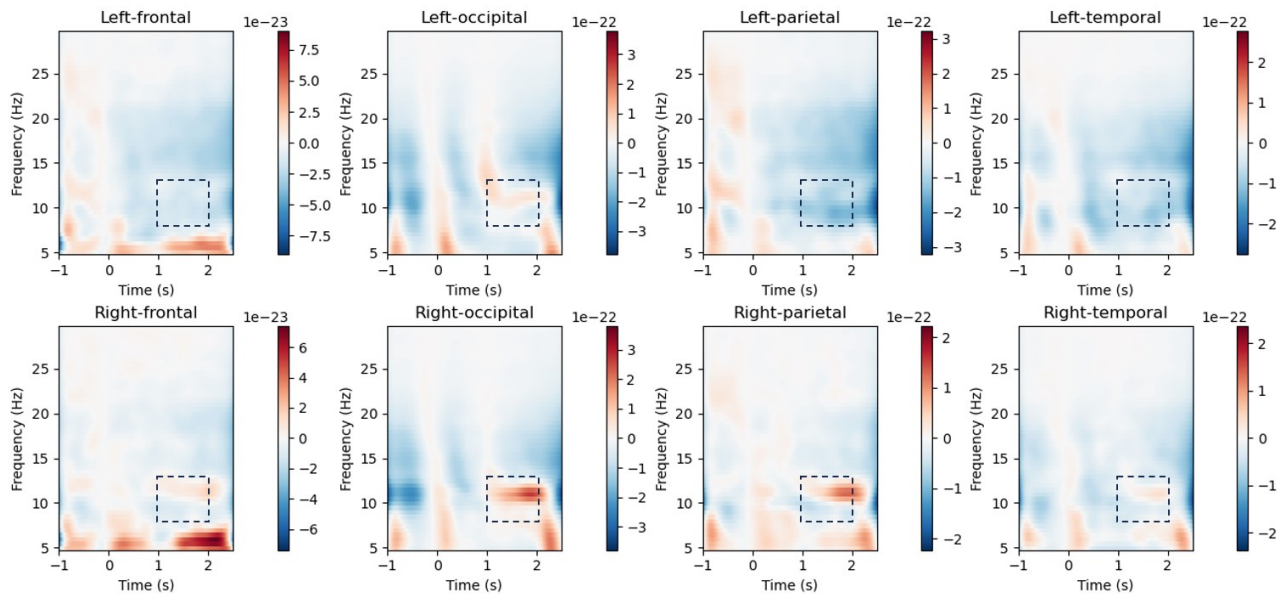
KUVA 3. TFR-kuvaajat 5–30 Hz taajuuksilla aivoalueittain koetilanteessa, jossa on esitetty validi muistivihje ajanhetkellä 0 s. Kuvaajat sisältävät sekä väriin että suuntaan perustuvat muistivihjeet. Tarkasteltu aika- ja taajuusväli on rajattu katkoviivalla. Kuvaajat esittävät koehenkilöiltä laskettuja keskiarvoja. Huom. Kuvaajien voimakkuuskaalat ovat toisistaan poikkeavia.

## Vain väriin perustuva ärsyke



KUVA 4. TFR-kuvaajat 5–30 Hz taajuuksilla aivoalueittain koetilanteessa, jossa on esitetty väriin perustuva muistivihje ajanhetkellä 0 s. Tarkasteltu aika- ja taajuusväli on rajattu katkoviivalla. Kuvaajat esittävät koehenkilöiltä laskettuja keskiarvoja. Huom. Kuvaajien voimakkuuskaalat ovat toisistaan poikkeavia.

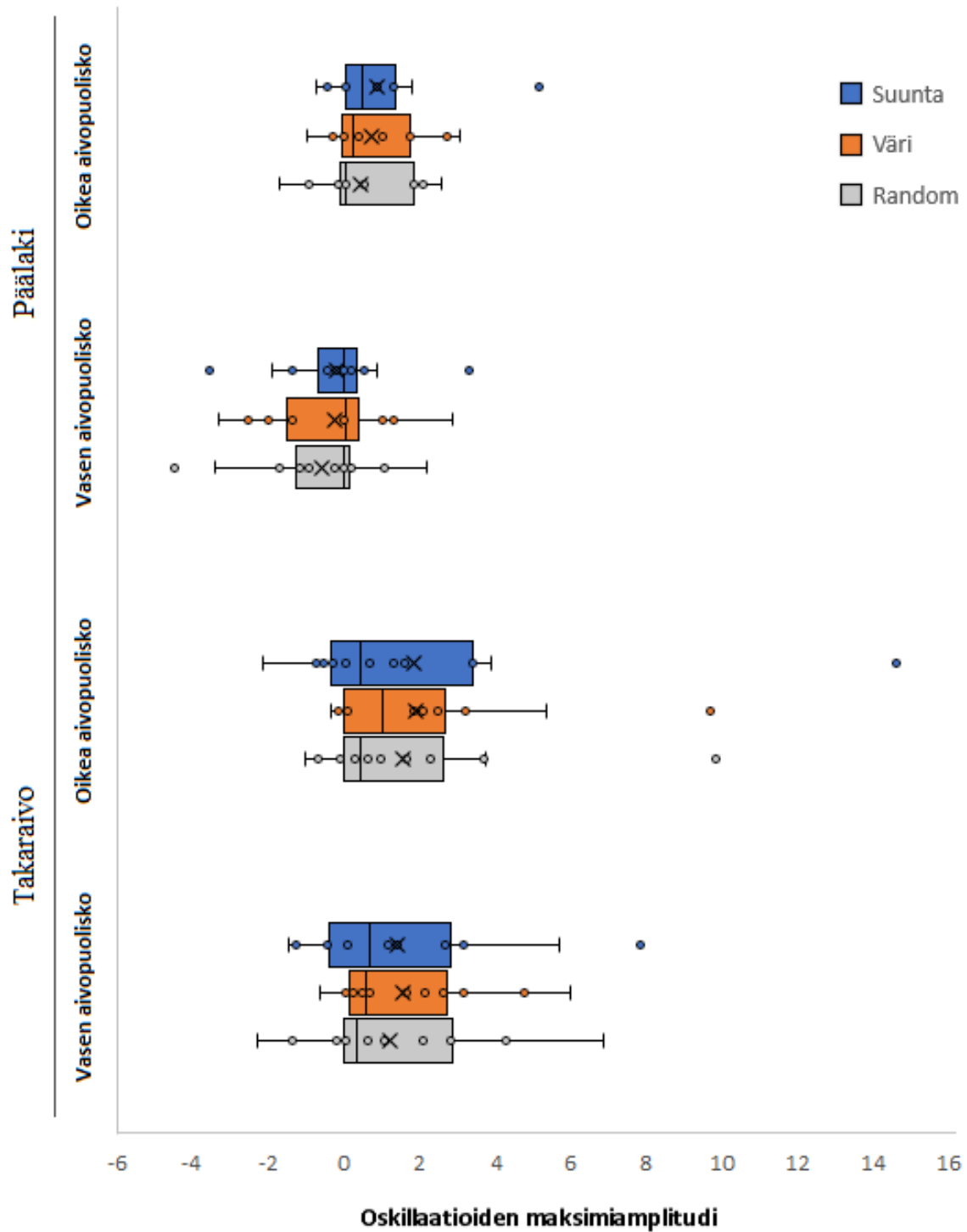
## Vain suuntaan perustuva ärsyke



KUVA 5. TFR-kuvaajat 5–30 Hz taajuuksilla aivoalueittain koetilanteessa, jossa on esitetty suuntaan perustuva muistivihje ajanhetkellä 0 s. Tarkasteltu aika- ja taajuusväli on rajattu katkoviivalla. Kuvaajat esittävät koehenkilöiltä laskettuja keskiarvoja. Huom. Kuvaajien voimakkuuskaalat ovat toisistaan poikkeavia.

Jakaumien tarkastelussa havaittiin yhdellä koehenkilöllä olevan muista koehenkilöistä huomattavasti poikkeavia havaintoja (ks. Kuva 6). Yhden muuttujan osalta myös kahdella muulla koehenkilöllä oli poikkeavia havaintoja, mutta poikkeamat eivät olleet yhtä suuria. Näistä havainnoista huolimatta päädyttiin toteuttamaan analyysit alustavasti kaikilla koehenkilöillä. Eri aivoalueilta mitattujen maksimiamplitudien keskiarvot ja -hajonnat ovat nähtävissä taulukossa 1.

Yhdysvaikutuksia tarkastellessa havaittiin, että aivopuoliskolla, aivoalueella ja ärsyketyypillä ei ollut tilastollisesti merkitsevää yhdysvaikutusta alfarytmin voimakkuuteen ( $F(2, 12)=.03$ ,  $p=.967$ ,  $\eta^2p=.006$ ). Myöskään aivopuoliskon  $\times$  ärsyketyypin ( $F(2, 12)=.04$ ,  $p=.959$ ,  $\eta^2p=.007$ ) ja aivopuoliskon  $\times$  aivoalueen ( $F(1, 13)=1.482$ ,  $p=.245$ ,  $\eta^2p=.102$ ) yhdysvaikutukset eivät olleet tilastollisesti merkitseviä. Aivoalueen ja ärsyketyypin yhdysvaikutuksen osalta rikottiin sfäärisyysoletusta ( $p=.003$ ), minkä vuoksi sen merkitsevyyden tulkintaan käytettiin Greenhouse-Geisser-korjausta. Yhdysvaikutus ei kuitenkaan ollut tilastollisesti merkitsevää ( $F(1.23, 21.28)=.25$ ,  $p=.676$ ,  $\eta^2p=.019$ ) riippumatta siitä, mitä tuloksia tulkittiin. Saadulla ärsykkeellä ei yhdysvaikutusten mukaan ollut muuntavaa vaikutusta eri aivoalueilla esiintyvän alfarytmin voimakkuuteen (tutkimuskysymys 3).



KUVA 6. Alfa-oskillaatioiden maksimiampplitudit kaikilla koehenkilöillä (n=14) ärsyketyypin mukaan molemmissa aivopuoliskoissa sekä takaraivo- että päälakialueilla. Pisteet kuvaavat yksittäisiä havaintoja ja ”X”-merkit havaintojen keskiarvoja.

TAULUKKO 1. Mitattujen maksimiampplitudien keskiarvot ja -hajonnat esitetyn ärsykkeen mukaan kaikilla koehenkilöillä (n=14).

	Random		Väri		Suunta	
	ka	kh	ka	kh	ka	kh
Alue						
Vasen päälaki	-.61	1.71	-.27	1.61	-.21	1.52
Oikea päälaki	.43	1.23	.72	1.20	.87	1.45
Vasen takaraivo	1.21	2.40	1.54	1.97	1.41	2.66
Oikea takaraivo	1.51	2.81	1.86	2.79	1.80	4.08

Yksittäisten faktorien päävaikutuksia tarkasteltaessa havaittiin, että aivopuoliskon vaikutus oli tilastollisesti merkitsevä ( $F(1, 13)=9.67$ ,  $p=.008$ ,  $\eta^2p=.427$ ). Keskiarvojen perusteella oskillaatioiden maksimiampplitudit olivat voimakkaampia oikeassa aivopuoliskossa. Myös aivoalueen päävaikutus oli tilastollisesti merkitsevä ( $F(1, 13)=8.09$ ,  $p=.014$ ,  $\eta^2p=.384$ ) siten, että maksimiampplitudit olivat suurempia aivojen takaraivoalueella. Ärsyketyypin päävaikutus ei kuitenkaan ollut tilastollisesti merkitsevä ( $F(2, 12)=1.14$ ,  $p=.352$ ,  $\eta^2p=.160$ ). Tehtävässä annetun muistivihjeen sisällöllä ei tämän perusteella ollut vaikutusta alfarytmin voimakkuuteen. Cohenin (1988) laatiman luokituksen mukaan kaikkien yksittäisten faktorien osalta efektikoot olivat kuitenkin suuria ( $\eta^2p \geq .140$ ). Arvioitujen efektikokojen perusteella aivopuolisko selitti voimakkuuden vaihtelusta 42,7 %, aivoalue 38,4 % ja ärsyketyyppi 16 %.

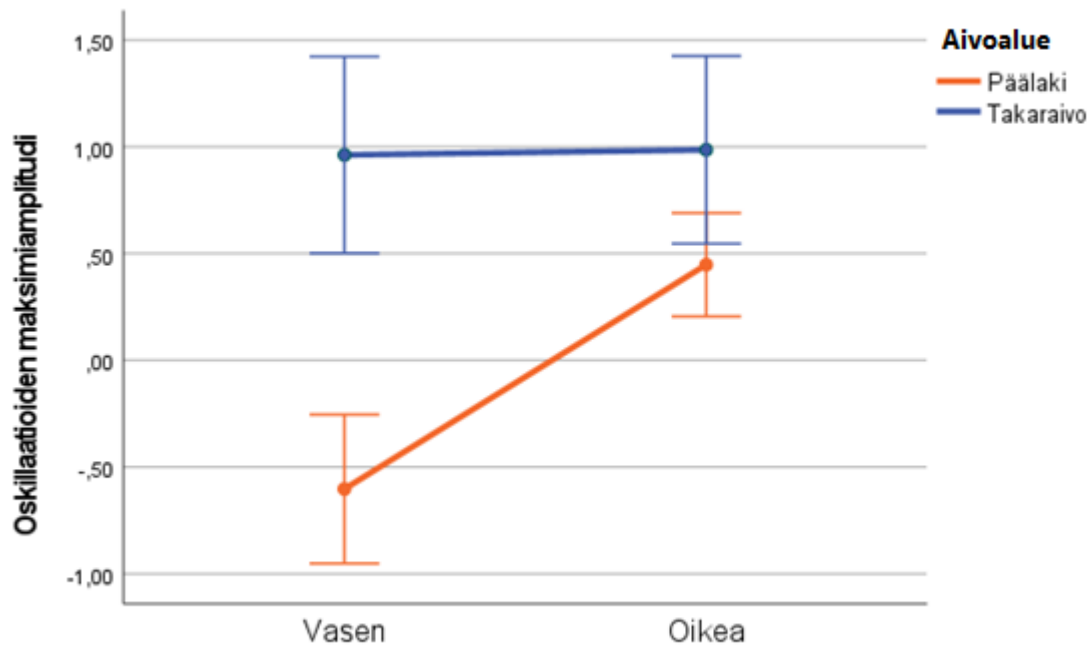
Päävaikutusten tarkastelun lisäksi suoritettiin ärsyketyypin osalta myös tarkempia jatkotarkasteluja, koska oltiin kiinnostuneita erityisesti ärsyketyyppien välisistä eroista (tutkimuskysymykset 1 ja 2). Jatkotarkastelut osoittivat, ettei neutraalin ja väriin perustuvan vihjeen ( $F(1, 13)=1.51$ ,  $p=.183$ ,  $\eta^2p=.132$ ), neutraalin ja suuntaan perustuvan vihjeen ( $F(1, 13)=1.91$ ,  $p=.191$ ,  $\eta^2p=.128$ ) eikä suuntaan ja väriin perustuvan vihjeen ( $F(1, 13)=.71$ ,  $p=.415$ ,  $\eta^2p=.052$ ) välillä ollut tilastollisesti merkitseviä eroja. Nämä havainnot tukivat päävaikutusten tarkastelussa saatua tulosta, jonka mukaan ärsyketyypillä ei ollut merkitsevää vaikutusta alfarytmin voimakkuuteen. Tulosten perusteella alfarytmin voimakkuus siis vaihteli aivojen eri osien välillä, mutta tehtävän aikana saadulla ärsykkeellä ei ollut tähän muuntavaa vaikutusta. Lisäksi alfarytmin voimakkuudessa ei ollut eroja tehtävässä annettujen muistivihjeiden välillä.

Poikkeavien havaintojen vuoksi analyysi päätettiin toistaa niin, että siitä jätettiin pois yksi koehenkilö (n=13). Muuttuneet tunnusluvut ovat nähtävissä taulukossa 2. Koehenkilön poisjättämisellä ei kuitenkaan ollut merkittävää vaikutusta analyysillä saatuihin tuloksiin.

Aivopuoliskon ja aivoalueen yhdysvaikutus tosin muuntui suuntaa antavaksi ( $F(1, 12)=4.28$ ,  $p=.061$ ,  $\eta^2p=.263$ ). Keskiarvojen perusteella amplitudien aivopuoliskojen väliset erot olivat suurempia päälaki- kuin takaraivoalueella (ks. Kuva 7). Tutkimuksen kannalta huomionarvoista kuitenkin oli, että ärsyketyypin tai sen yhdysvaikutusten osalta oleellista muutosta tuloksissa ei tapahtunut.

TAULUKKO 2. Mitattujen maksimiampitudien keskiarvot ja -hajonnat esitetyn ärsykkeen mukaan, kun aineistosta on jätetty pois yksi poikkeavia havaintoja saanut koehenkilö (n=13).

	Random		Väri		Suunta	
	ka	kh	ka	kh	ka	kh
Alue						
Vasen päälaki	-.82	1.57	-.50	1.39	-.48	1.19
Oikea päälaki	.26	1.11	.54	1.03	.54	.81
Vasen takaraivo	.78	1.84	1.20	1.56	.91	1.99
Oikea takaraivo	.88	1.54	1.26	1.72	.82	1.82



KUVA 7. Alfarytmin maksimiampitudit aivopuoliskoittain päälaki- ja takaraivoalueilla (n=13). Kuvaajat esittävät kaikkien ärsyketyyppien keskiarvoja. Virhejanat kuvaavat keskiarvon keskivirhettä (+/-1S).

## 4 POHDINTA

Tämän tutkimuksen tarkoituksena oli tutkia aivojen alfarytmin roolia tarkkaavuuden kohdentamisessa silloin, kun tarkkaavuutta suunnataan mieleen painettuihin visuaalisiin piirteisiin. Aihetta tutkittiin analysoimalla muistinvaraista tarkkaavuutta vaativan muistitehtävän aikana mitattua MEG-aineistoa. Tehtävä perustui takautuvasti annettuun muistivihjeeseen, jonka tarkoituksena oli ohjata koehenkilöä kiinnittämään huomionsa visuaalisiin yksityiskohtiin, jotka tämä oli aikaisemmin painanut mieleensä. Tutkimuksen kohteeksi valikoitui alfarytmi, koska sillä on aikaisempien tutkimusten perusteella tulkittu olevan keskeinen rooli tarkkaavuuden suuntaamisessa niin ulkoiseen kuin sisäiseenkin visuaaliseen tietoon (ElShafei ym., 2022; Hajonides ym., 2020; Händel ym., 2011; Poch ym., 2014; Ter Huurne ym., 2013). Tämän vuoksi oletuksena oli, että alfarytmi osallistuisi myös yksittäisten visuaalisten piirteiden valikoimiseen.

Tilastollisten testien perusteella ei havaittu merkitsevää eroa alfarytmin maksimiamplitudin voimakkuudessa validin ja neutraalin vihjetyypin välillä. Näin ollen tehtävässä saatu validi muistivihje ja sen huomioimisesta seurannut tarkkaavuuden suuntaaminen eivät olleet yhteydessä alfarytmin voimakkuuteen (tutkimuskysymys 1). Myöskään suuntaan ja väriin perustuvan muistivihjeen välillä ei havaittu merkitsevää eroa alfarytmin maksimiamplitudeissa (tutkimuskysymys 2). Näiden havaintojen perusteella alfarytmi ei siis osallistunut tarkkaavuuden kohteena olevien visuaalisten piirteiden erottelemiseen. Lisäksi annetulla muistivihjeellä ei ollut vaikutusta siihen, miten alfarytmin voimakkuus vaihteli aivojen päälaki- ja takaraivoalueiden välillä (tutkimuskysymys 3). Saadut tulokset eivät vastanneet ennakkoon asetettua odotusta, jonka mukaan validin muistivihjeen oletettiin aiheuttavan erilaista alfarytmin modulaatiota neutraaliin muistivihjeeseen verrattuna. Löydökset olivat ristiriidassa aikaisempien havaintojen kanssa, joiden perusteella alfarytmin on tulkittu osallistuvan tarkkaavuuden kohteena olevien muistiedustusten valitsemiseen (Hajonides ym., 2020; Li ym., 2023; Poch ym., 2017; Schneider ym., 2019).

### 4.1. Alfarytmin vaikutusmekanismit sisäisen tarkkaavuuden suuntaamisessa

Tässä tutkimuksessa saatujen tulosten perusteella ei löytynyt viitteitä siitä, että alfarytmillä olisi välitöntä roolia sisäisen tarkkaavuuden suuntaamisessa silloin, kun tarkkaavuutta suunnataan



yksittäisiin mieleen painettuihin visuaalisiin piirteisiin. Löydökset tukevat näkemystä, jonka mukaan alfarytmin modulaatio voisi olla seurausta jostakin muusta kuin tarkkaavuuden kohteena olevien muistiedustusten sisältämien yksityiskohtien valikoimisesta. Kuten TFR-kuvaajien silmämääräisessä tarkastelussa tuli ilmi, alfarytmissä vaikutti tapahtuvan modulaatiota tehtävän suorittamisen aikana, joten alfarytmillä voidaan tästä huolimatta todeta olleen jonkinlainen rooli muistitehtävän suorittamisessa. Siitä, mitkä kognitiiviset prosessit muutosta tarkalleen ottaen aiheuttivat, ei ainoastaan näiden tulosten perusteella kuitenkaan voida esittää luotettavia tulkintoja.

Saadut tulokset eivät olekaan linjassa aiempien löydösten kanssa, joissa tarkkaavuuden suuntaamisen ja muistitehtävässä saadun vihjeen välinen yhteys on havaittu. On kuitenkin tärkeää huomioda, etteivät aikaisemmat tutkimuksetkaan ole olleet muistivihjeiden välisistä eroista yksimielisiä. Esimerkiksi Hajonides ja kumppanit (2020) ovat tulkinneet ulottuvuuteen perustuvan muistivihjeen aiheuttavan alfarytmin vaimenemista, kun taas Schneider ja kumppanit (2019) ovat tulkinneet vihjeen aiheuttavan alfarytmin voimistumista. Tutkimusten välillä on kuitenkin eroja käytetyissä koeasetelmissa ja analyysimenetelmissä, eikä suorien vertailujen tekeminen näiden välillä ole välttämättä täysin mielekäästä.

Aikaisemmista tutkimuksista poikkeavia tuloksia saattavat selittää erityisesti erot käytetyissä muistivihjeissä. Useissa aikaisemmissa tutkimuksissa on hyödynnetty värillisiä muistivihjeitä, jotka ohjaavat koehenkilön tarkkaavuutta yhteen tiettyyn samanväriseen kappaleeseen (Li ym., 2023; Poch ym., 2017; Schneider ym., 2019). Tämän vuoksi tarkkaavuuden kohteena olevan kappaleen sijainti on voinut vaikuttaa alfarytmin voimakkuuteen näissä tutkimuksissa. Lisäksi useissa tutkimuksissa on hyödynnetty erillisiä häiriöärsykejä (Hajonides ym., 2020; Schneider ym., 2019), jotka ovat myös voineet vaikuttaa niissä saatuihin tuloksiin.

Vaikuttaisi hyvin mahdolliselta, että alfarytmi osallistuu tarkkaavuuden suuntaamiseen mekanismilla, joka ei perustu tarkkaavuuden kohteena olevien muistiedustusten sisältämien ominaisuuksien erottelemiseen. Vaikka saatujen tulosten perusteella tätä toimintamekanismia voidaan vain spekuloida, vaikuttaisivat saadut tulokset yhdessä aikaisempien tutkimusten kanssa viittaavan siihen, että tämä mekanismi voisi perustua integroitujen muistiedustusten sijainninvaraiseen paikantamiseen. Tässä tutkimuksessa tarkkaavuuden spatiaalisesta suuntaamisesta aiheutuvat muutokset kontrolloitiin, joten tältä osin saadut tulokset tukevat tätä näkemystä. Näin ollen alfarytmi saattaisi osallistua jonkinlaisen mentaalisen kartan ylläpitämiseen, jonka mukaan aivot järjestelevät mielen sisäisiä representaatioita. Näin pitkälle menevää tulkintaa ei pelkästään näiden tulosten valossa voida luotettavasti esittää, mutta mikäli alfarytmillä todella on rooli visuaalisten muistiedustusten paikantamisessa, ei tällaista mahdollisuutta voida täysin sivuuttaa.

Lisäksi on syytä huomata, että koehenkilöiden välillä oli havaittavissa huomattavaa vaihtelua alfarytmissä esiintyneissä maksimiampplitudeissa. Tämä näyttäytyy tunnuslukuja tarkasteltaessa suurina keskihajontoina (ks. Taulukot 1 ja 2). Vaikka osa tästä vaihtelusta selittyy epäilemättä joko yksilöllisestä vaihtelusta aivojen toiminnassa tai mahdollisista mittausteknisistä häiriötekijöistä, ei täysin voida sulkea pois sitäkään mahdollisuutta, että alfarytmiin ovat vaikuttaneet myös erot koehenkilöiden käyttämissä muististrategioissa. Voi hyvin olla, että jonkinlaisen visuospatiaalisen hahmottelutekniikan käyttö sai aikaan poikkeuksellista alfarytmin modulaatiota osalla koehenkilöistä, vaikka tehtävä itsessään ei spatiaalista kohdistamista suoranaisesti edellyttänytkään. On hyvin mahdollista, että aivoilla ei ole yhtä yhtenäistä tapaa hyödyntää muistivihjeestä saatavaa lisätietoa. Ajatusta tukee Vicente-Grabovetskyn ja kumppanien (2014) esittämä tulkinta, jonka mukaan käytetty muististrategia vaikuttaa visuaalisten muistiedustusten sisältöön ja niiden käsittelyyn. Erilaisten strategioiden käyttöä ei kuitenkaan tässä tutkimuksessa huomioitu, joten tätä on mahdollista vain arvella.

Suoria kausaalisuhteita muistinvaraisen tarkkaavuuden ja alfarytmin välillä ei saatujen tulosten perusteella voida osoittaa. Havaintojen valossa mahdollista on sekin, että alfarytmillä ei ole sisäisessä tarkkaavuudessa mitään suoraa toiminnallista merkitystä. Vaikka alfarytmin osallisuutta sisäisen tarkkaavuuden toimintaan on pidetty hyvin todennäköisenä, on vastakkaisiakin tulkintoja esitetty. Erään vaihtoehtoisen näkemyksen mukaan alfarytmi ei ole suoraan yhteydessä tarkkaavuuden toimintaan, vaan sen modulaatiota tapahtuu enemmänkin tarkkaavuuden suuntaamisen seurauksena (Mössing & Busch, 2020). Tämän tulkinnan mukaan voidaan pitää mahdollisena, että sekä alfarytmin modulaation että tarkkaavuuden suuntaamisen taustalla on jokin muu yhteinen taustatekijä. Vaikka näiden tulosten perusteella ei voida täysin kiistää alfarytmin merkitystä, ne antavat kuitenkin viitteitä siitä, että alfarytmin rooli sisäisessä tarkkaavuudessa on aikaisempia olettamuksia rajallisempi.

Vaikka väriin ja suuntaan perustuvien muistivihjeiden välisiä eroja ei tässä tutkimuksessa havaittu, ei voida vielä tehdä johtopäätöstä, että aivot käsittelevät erilaisiin piirteisiin kohdistuvaa tarkkaavuutta samalla tavalla. Tässä tutkimuksessa keskityttiin tarkastelemaan ainoastaan alfarytmissä tapahtuneita muutoksia, joten erot saattavat löytyä joistakin muista aivotoiminnoista. Lisäksi on syytä huomata, että TFR-kuvaajien silmämääräisessä tarkastelussa saattoi tulla ilmi hienovaraisia eroja vihjetyyppien välillä, jotka eivät tulleet huomioiduksi pelkästään maksimiampplitudien välisissä vertailuissa. Mahdollisia eroja vihjetyyppien välillä ei voida siis täysin poissulkea, ja myös ajassa tapahtuvia muutoksia vihjetyyppien välillä olisi jatkossa aiheellista tutkia. Pelkästään näiden tulosten perusteella eri piirteiden välisistä suhteista ei yleisemmällä tasolla voida esittää luotettavia tulkintoja.

Tilastollisten analyysien yhteydessä löydettiin tilastollisesti merkitsevä ero alfarytmin maksimiampplitudeissa sekä aivopuoliskojen että takaraivo- ja päälakialueiden välillä. Tämän perusteella alfarytmin voidaan todeta muuttuneen tehtävän suorittamisen aikana ja moduloituneen eri tavalla aivojen eri osissa. Alfarytmi oli voimakkaampaa oikeassa aivopuoliskossa ja aivojen takaraivoalueella, mutta voimakkuus vaihteli samansuuntaisesti molemmilla aivoalueilla. Koska modulaatio oli kuitenkin muistivihjeestä riippumatonta, nämä havainnot vaikuttaisivat viittaavan siihen, että erot olivat seurausta jostakin muusta kuin sisäisen tarkkaavuuden toiminnasta. Varteenotettavana selittäjänä voidaan pitää työmuistia, jonka toimintaa alfarytmin on tarkkaavuuden lisäksi tulkittu mahdollisesti edustavan (Riddle ym., 2020). Erityisen mielenkiintoisena voidaan pitää kuitenkin näissä löydöksissä havaittavaa alfarytmin lateralisaatiota, jota esiintyi siitäkkin huolimatta, että spatiaaliset tekijät oli koeasetelmassa huomioitu. Tämä antaa viitteitä myös alfarytmin taustalla vaikuttavien toimintojen lateralisoitumisesta. Yksityiskohtaisempia tulkintoja tämän lateralisaation tarkoituksesta tai aiheuttajista ei tämän tutkimuksen puitteissa ole kuitenkaan mahdollista tehdä.

Mikäli alfarytmillä todella on rooli sisäisen tarkkaavuuden suuntaamisessa, ei se näiden tulkintojen valossa ole välttämättä aivan yksiselitteinen. Tarkkoja johtopäätöksiä tässä tutkimuksessa saatujen tulosten valossa ei kuitenkaan voida tehdä tutkimuksen eksploraatiivisen luonteen, aineiston heterogeenisyyden ja tilastollisissa testeissä käytettyjen muuttujien vinouden vuoksi. Vaikka suoritettujen analyysien perusteella muistivihjeen vaikutus alfarytmiin ei saavuttanutkaan tilastollista merkitsevyyttä, sen arvioitu efektikoko oli tulkittavissa suureksi (Cohen, 1988).

## **4.2. Tutkimuksen vahvuudet**

Yhtenä tämän tutkimuksen etuna voidaan pitää aiempaa kontrolloidumman ulottuvuuteen perustuvan muistivihjeen hyödyntämistä. Tällä vihjeellä pystyttiin huomioimaan tarkkaavuuden spatiaalisesta kohdistamisesta aiheutuva alfarytmin lateralisaatio. Aiemmissa tutkimuksissa on havaittu, että alfarytmin voimakkuus vaihtelee aivopuoliskoittain sen mukaan, kummalle puolelle näkökenttää tarkkaavuutta suunnataan (Myers ym., 2015; Poch ym., 2014; Rösner ym., 2020). Tässä tutkimuksessa tätä ilmiötä ei kuitenkaan havaittu, sillä koehenkilöiden tuli kohdistaa tarkkaavuuttaan samanaikaisesti molemmille puolille näkökenttää. Toisin kuin aikaisemmissa tutkimuksissa, joissa vihje ohjasi tarkkaavuutta johonkin tiettyyn kappaleeseen, tässä

tutkimuksessa vihje ohjasi tarkkaavuutta yksittäisten kappaleiden sijaan useisiin eri kappaleisiin ja niiden sijainteihin samanaikaisesti. Kun kiinnostuksen kohteena olevat kappaleet lisäksi sijaitsivat tehtävässä aina samoissa paikoissa, niin muutokset niiden sijainneissa eivät päässeet vaikuttamaan alfarytmin voimakkuuteen. Tämä oli etu aikaisempiin tutkimuksiin nähden, joissa havaittu alfarytmin modulaatio saattoi olla seurausta tarkkaavuuden kohteina olevien kappaleiden sijainninvaraisesta paikantamisesta.

Toinen muistivihjeellä saatu etu aikaisempiin tutkimuksiin verrattuna oli, että vihje annettiin koehenkilölle sanallisessa muodossa. Aikaisemmissa tutkimuksissa vihjeenä on tyypillisesti käytetty erilaisia visuaalisia symboleja, kuten oleellisen kappaleen sijaintia osoittavaa nuolta (Poch ym., 2014; Schneider ym., 2015) tai kappaletta, joka on samanvärinen kuin kiinnostuksen kohteena olevan kappale (Poch ym., 2017). Sanallisen muistivihjeen vaikutuksia tarkkaavuuteen ei sen sijaan ole aikaisemmin tutkittu. Aivot saattavat prosessoida ja hyödyntää eri muodossa esitettyjä muistivihjeitä eri tavoin tarkkaavuuden suuntaamisessa, joten myös erityyppisten vihjeiden yhteyttä sisäisen tarkkaavuuden toimintaan on aiheellista tutkia. Sanallisen vihjeen käsittelyyn voisi ajatella liittyvän kuvavihjettä enemmän abstraktin tiedon käsittelemistä ja soveltamista, millä voi olla oma vaikutuksensa myös alfarytmin moduloitumiseen. On mahdollista, että kuvalliseen muistivihjeeseen sisältyy jo lähtökohtaisesti enemmän alfarytmiin vaikuttavaa visuospatiaalista informaatiota, jota sanalliseen vihjeeseen ei välttämättä sisälly.

Lisäksi tarkkaavuutta suunnattiin tässä tutkimuksessa kahdella toisistaan poikkeavalla vihjetyypillä, joista toinen ohjasi tarkkaavuutta mieleen painettujen kappaleiden väreihin ja toinen kappaleiden suuntiin. Ulottuvuusperusteisten muistivihjetyyppien välisiä eroja aivojen rytmisessä toiminnassa ei ole aikaisemmin tutkittu, minkä vuoksi tämä tutkimus toi aiempaa tarkempaa tietoa siitä, miten hyödynnettävän muistivihjeen sisältö vaikuttaa aivojen rytmiseen toimintaan. Tämän ansiosta pystyttiin luotettavammin esittämään, ettei tarkkaavuuden kohteena olevalla visuaalisella piirteellä itsessään näytä olevan vaikutusta alfarytmin voimakkuuteen.

Tutkimuksessa käytetyn aineiston mittaamisessa hyödynnettiin yleisemmin käytetyn EEG:n sijasta MEG-kuvantamista, mikä toi osaltaan uutta näkökulmaa sisäisen tarkkaavuuden neuraalista perustaa selventävään tutkimukseen. MEG:n avulla oli mahdollista saavuttaa muita kuvantamismenetelmiä tarkempi signaalinpaikannus, minkä ansiosta pystyttiin tarkemmin kuvaamaan, missä aivojen osissa alfarytmin modulaatiota mahdollisesti tapahtui. Näin pystyttiin aiempaa tarkemmin vertailemaan aivoalueiden välisiä eroja alfarytmin voimakkuudessa. Lisäksi aineistoa mitattiin koko pään alueelta, mikä olisi mahdollistanut oskillaatioiden tarkastelemisen myös aivojen otsa- ja ohimoalueilla. Aikaisemman kirjallisuuden perusteella tätä ei kuitenkaan

pidetty tutkimuksen kannalta kiinnostavana, minkä vuoksi tarkastelut rajattiin ainoastaan aivojen päälaki- ja takaraivoalueille.

### 4.3. Tutkimuksen rajoitukset

Muiden kognitiivisten toimintojen vaikutusta alfarytmiin kokeen aikana ei ole mahdollista täysin poissulkea, mikä on voinut vaikuttaa tutkimuksessa saatuihin tuloksiin. Tämä ongelma on saattanut korostua erityisesti alfarytmin perustilaa kuvaavan baseline-ajanjakson määrittelyssä. Tämä on saattanut vääristää tilastollisia vertailuja, mikäli valittu ajanjakso ei oletusten mukaisesti olekaan edustanut neutraalia kontrollitilannetta. Tässä tutkimuksessa baseline sijoittui -250ms – 0ms muistivihjeen esittämistä edeltäneelle aikavälille, jolloin siihen on saattanut vaikuttaa esimerkiksi työmuistin ylläpitämisen tai ennakoivan tarkkaavuuden aiheuttamat muutokset. Tulokset olisivatkin saattaneet oleellisesti muuttua, mikäli ajanjakso olisi sijoitettu huomattavasti varhaisemmalle aikavälille.

Vakiintunutta käytäntöä kontrollijakson sijoittamisesta vastaavanlaisessa koeasetelmassa ei ole, mutta varhaisimmillaan se on sijoitettu 200 – 300ms muistijoukon esittämistä edeltäneelle aikavälille (Poch ym., 2017; Schneider ym., 2015). Myös tähän tutkimuksen verrattavissa olevia ajankohtia on kuitenkin käytetty (Li ym., 2023). Jatkotutkimuksissa vertailukelpoisen kontrollijakson valintaan olisi kaikesta huolimatta tärkeää kiinnittää huomioita, jotta kaikki alfarytmiin mahdollisesti vaikuttavat tekijät saataisiin varmuudella luotettavasti kontrolloitua. Joissakin aikaisemmissa tutkimuksissa ajankohtien välistä vertailua on myös tarkennettu erillisellä baseline-korjauksella (Myers ym., 2015; Poch ym., 2014), jollaista tässä tutkimuksessa ei toteutettu. Vastaavanlaisen korjauksen käyttöä olisi vastaisuudessa syytä harkita, sillä se voi vaikuttaa saatujen tulosten tarkkuuteen.

Huomattavan yksilöllisen vaihtelun vuoksi olisi houkuttelevaa esittää aineiston pientä kokoa yhdeksi tämän tutkimuksen rajoitteeksi. Mikäli tarkastellaan tämän tutkimuksen osalta silmämääräisesti ainoastaan keskiarvoja (ks. Taulukot 1 ja 2), voidaan alfarytmin maksimiamplitudien havaita olleen lähes poikkeuksetta suurempia tilanteessa, jossa on esitetty validi muistivihje. Näin ollen suurempi aineisto olisi saattanut kertoa todenmukaisemman kuvan näiden tunnuslukujen välisestä suhteesta ja parantanut tulosten yleistettävyyttä. Lisäksi vinoumaa tuloksiin saattoi aiheuttaa sekin, että nuoret korkeakouluopiskelijat olivat rekrytointimenetelmien vuoksi aineistossa ylliedustettuna. On kuitenkin syytä huomata, että vaikka tilastollisesti

merkitsevää yhteyttä muistivihjeen ja alfarytmin välillä ei löytynyt, yhteys aivoalueen ja alfarytmin välillä oli kuitenkin selvästi havaittavissa. Muistivihjeiden välisten erojen puuttuminen ei siis välttämättä selity yksinomaan tilastollisten testien konservatiivisuudella. Tämä saattaisi viitata muistivihjeen hyödyntämiseen liittyviin yksilöllisiin tekijöihin, jotka eivät ole yleistettävissä koko aineistoon. Täysin selvää näiden tietojen valossa ei ole sekään, missä määrin koehenkilöt todella hyödynsivät muistivihjettä apuna tehtävän suorittamisessa. Tämä on osaltaan voinut vaikuttaa siihen, miten koehenkilöt ovat tehtävän aikana tarkkaavuuttaan suunnanneet.

Aivoalueiden välisissä vertailuissa rajoituksena oli, että vertailut rajattiin aiempaan kirjallisuuteen nojaten ainoastaan aivojen takaraivo- ja päälakialueille. TFR-kuvaajien silmämääräisessä tarkastelussa oli kuitenkin havaittavissa mahdollista muutosta myös esimerkiksi aivojen ohimoalueilla. Tulokset olisivatkin saattaneet muuttua, mikäli myös nämä alueet olisi huomioitu tilastollisissa vertailuissa. Lisäksi on syytä huomioida, että aineistoa analysoitaessa ei tehty erillistä lähdemallinnusta, vaan signaalinlähteet arvioitiin suuntaa antavasti suoraan MEG-kanavien sijaintien perusteella. Näin ollen vertailuissa käytetyt aivoalueet eivät täysin vastanneet aivojen anatomisia alueita, mikä saattoi myös vaikuttaa vertailujen tuloksiin.

Tässä tutkimuksessa tarkasteltiin ainoastaan koetilanteiden välisiä eroja alfarytmin maksimiamplitudeissa, joten ei ole mahdollista tarkasti sanoa, millaisia muutoksia alfarytmissä mahdollisesti tapahtui kokeen suorittamisen aikana. Tämän vuoksi jotkut yksityiskohtaisemmat muutokset alfarytmin voimakkuudessa saattoivat jäädä vertailuissa huomaamatta. Huomattavan yksilöllisen vaihtelun vuoksi poikkeuksellisen suuret tai pienet maksimiamplitudit saattoivat lisäksi aiheuttaa vinoumaa tilastollisiin tarkasteluihin, vaikka poikkeavien havaintojen poisjättäminen ei tuloksiin oleellisesti vaikuttanutkaan.

#### **4.4. Tulosten merkitys ja jatkotutkimusaiheita**

Tämän tutkimuksen tavoitteena oli tuoda uutta tietoa alfarytmin yhteydestä sisäiseen tarkkaavuuteen ja siten myös sisäisen tarkkaavuuden toiminnasta. Tämän tutkimiseen käytettiin visuaalisia takautuvia muistivihjeitä, joiden tarkoituksena oli ohjata koehenkilöiden tarkkaavuutta heidän mieleen painamiinsa visuaalisiin representaatioihin, ja vielä tarkennettuna näissä representaatioissa esiintyneisiin visuaalisiin piirteisiin. Tulosten perusteella hyödyllisen (validin) ja hyödyttömän (neutraalin) muistivihjeen välillä ei ollut eroja alfarytmin voimakkuudessa. Tämän perusteella alfarytmin voimakkuus ei siis riippunut siitä, ohjasiko vihje tarkkaavuutta vai ei.

Tämän perusteella myöskään muistinvaraisen tarkkaavuuden suuntaaminen ei täten aiheuttanut muutoksia alfarytmissä. Vaikka näiden tulosten pohjalta ei olekaan mahdollista tehdä kovin yksiselitteisiä tulkintoja sisäisen tarkkaavuuden toiminnasta, ne tuovat uutta näkökulmaa ilmiötä tarkastelemaan tutkimukseen. Samalla ne omalta osaltaan lisäävät ymmärrystä sekä alfarytmin että sisäisen tarkkaavuuden toiminnasta, ja auttavat kiinnittämään huomiota sellaisiin tutkimuksen aikana ilmi tulleisiin tekijöihin, jotka seuraavissa tutkimuksissa olisi syytä huomioida.

Lisäksi tulokset auttavat omalta osaltaan ymmärtämään sitä, miten aivot hallitsevat mieleen painettuja visuaalisia representaatioita sekä yksittäisiä ominaisuuksia, joista nämä representaatiot koostuvat. Se, miten aivot integroivat yksittäisiä visuaalisia havaintoja yhtenäisiksi kokonaisuuksiksi, on suurilta osin edelleen ratkaisematon mysteeri. Näiden tulosten perusteella ainakaan alfarytmin toiminnalla yksittäisten visuaalisten piirteiden erottelemisessa ei ole selvää osuutta, joskin tutkimustietoa aiheesta tarvitaan lisää.

Jatkossa aiheellista olisi tehdä vertailua kappaleeseen ja ulottuvuuteen perustuvien muistivihjeiden välillä, jotta pystyttäisiin varmentamaan mahdolliset alfarytmin toiminnalliset erot näiden vihjetyyppien välillä. Vertailujen mahdollistamiseksi olisi erityisen tärkeää kiinnittää huomiota siihen, että kappaleperusteisissa tehtävissä tarkkaavuutta ohjataan molemmille puolille näkökenttää yhdenveroisesti. Tämä edellyttää näköärsykkeiden tasaista jakamista näkökentän molemmille puoliskoille. Näin kappaleiden sijainneista aiheutuva alfarytmin lateralisaatio pystytään kontrolloimaan myös tämän vihjetyyppin osalta. Lisäksi tutkimuksissa olisi hyvä kartoittaa koehenkilöiden käyttämiä muististrategioita ja varmistaa, että nämä todella olivat hyödyntäneet esitettyjä vihjeitä. Näiden tietojen avulla voitaisiin tehdä tarkempia tulkintoja siitä, miten alfarytmi mahdollisesti osallistuu tarkkaavuuden suuntaamiseen. Väestötasoisesta yleistämisen mahdollistamiseksi ilmiötä tulisi tutkia myös suuremmalla ja satunnaisesti poimitulla otoksella.

Tulevissa tutkimuksissa ulottuvuuteen perustuvaa muistivihjettä olisi hyvä tutkia värin ja suunnan lisäksi myös muiden visuaalisten piirteiden avulla. Näin pystyttäisiin tarkemmin tutkimaan sitä, yleistyvätkö alfarytmiä koskevat havainnot kaikkiin kappaleissa esiintyviin visuaalisiin piirteisiin. Muita mahdollisesti kiinnostavia visuaalisia ulottuvuuksia voisivat olla esimerkiksi visuaalisten kappaleiden geometrinen muoto tai kappaleiden koko.

Lisäksi aivopuoliskojen roolia sekä sisäisen tarkkaavuuden että työmuistin toiminnassa olisi syytä tutkia lisää. Tässä tutkimuksessa havaittiin alfarytmin lateralisoitumista siitäkin huolimatta, että sijainninvaraisesta kohdistamisesta aiheutuvat muutokset oli kontrolloitu. Tämä vaikuttaisi olevan osoitus siitä, että toiselle aivopuoliskolle lateralisoituneella alfarytmillä oli jonkinlainen rooli tehtävän suorittamisessa. Muistivihjeellä ei kuitenkaan havaittu olevan alfarytmin

voimakkuutta muuntavaa vaikutusta, minkä vuoksi on vaikeaa sanoa, mitkä kognitiiviset toiminnot muutosta aiheuttivat. Tämän selvittämiseksi voisi olla hyödyllistä tarkastella yksittäisten maksimiampplitudien sijaan myös alfarytmissä tapahtuvia muutoksia koeasetelman eri vaiheissa. Kiinnostavaa olisi tarkastella myös muissa aivorytmeissä tapahtuvia muutoksia tehtävän aikana, sillä alfan lisäksi myös esimerkiksi theta-taajuuksilla on ehdotettu olevan rooli sisäisen tarkkaavuuden suuntaamisessa (Li ym., 2023; Riddle ym., 2020).

Mainittakoon lopuksi, että jatkossa olisi aiheellista tarkastella tarkemmin erityisesti sanallisesti esitetyn muistivihjeen vaikutuksia sisäiseen tarkkaavuuteen. Tällaista muistivihjettä ei aikaisemmin ole käytetty sisäisen tarkkaavuuden neuraalista perustaa tarkastelevissa tutkimuksissa, ja on mahdollista, että muistivihjeen hyödyntämisessä vaadittu kielellinen prosessointi vaikuttaa myös tarkkaavuuden suuntaamiseen. Koska kielelliset toiminnot ovat varsinkin oikeakätisillä pääsääntöisesti lateralisoituneita (Gazzaniga & Sperry, 1967), sanallisen muistivihjeen mahdollisia vaikutuksia muistitehtävän suorittamiseen vaadittaviin aivotointoihin ei voida täysin sivuuttaa. Lisäksi tällainen muistivihje voi visuaalisessa tehtävässä vaatia aivoilta eri tasoista abstraktiota kuin kuvallinen muistivihje, joten myös tämä näkökulma olisi jatkossa aiheellista ottaa esille.

#### **4.5. Johtopäätökset**

Tässä tutkimuksessa saatujen tulosten perusteella aivoissa esiintyvällä alfarytmillä ei ole roolia tarkkaavuuden suuntaamisessa silloin, kun tarkkaavuutta kohdistetaan mieleen painetuissa objekteissa esiintyviin visuaalisiin piirteisiin. Tulokset eivät olleet linjassa aiempiin tutkimustuloksiin perustuvien odotusten kanssa, joiden perusteella alfarytmissä oletettiin tapahtuvan muutoksia silloin, kun koehenkilö kohdensi tarkkaavuuttaan tutkimuksessa suoritettujen takaumavihjetehtävien aikana. Vaikka näiden havaintojen perusteella alfarytmin roolia muistinvaraisessa tarkkaavuudessa voidaan vain spekuloida, yksi varteenotettava selitys on, että alfarytmi osallistuu yksittäisten visuaalisten piirteiden valitsemisen sijaan enemmänkin integroitujen visuaalisten muistiedustusten valikointiin ja paikantamiseen. Suoria kausaalisuhteita näiden ilmiöiden välillä ei saatujen tulosten perusteella ole kuitenkaan mahdollista päätellä.

Vaikka näiden tulosten perusteella ei olekaan mahdollista tehdä ratkaisevia johtopäätöksiä sisäisen tarkkaavuuden ja alfarytmin keskinäisestä vuorovaikutuksesta, ne ovat osaltaan osoitus visuaalisiin takautuviin muistivihjeisiin perustuvan koeasetelman toimivuudesta ilmiön



tutkimisessa. Samalla ne luovat pohjaa uusille tutkimussuuntauksille. Jatkossa tärkeää olisi perehtyä tarkemmin erityisesti siihen, miten erityyppiset muistivihjeet, sanalliseen muistivihjeeseen liittyvä kielellinen käsittely, muistitehtävässä suoriutuminen ja erilaisten muististrategioiden käyttö ovat mahdollisesti yhteydessä sisäisen tarkkaavuuden taustalla vaikuttaviin aivotoimintoihin.

## LÄHTEET

- Alho, K., Salmi, J., Degerman, A., & Rinne, T. (2006). Tarkkaavaisuus ja aivotoiminta. Teoksessa H. Hämäläinen, M. Laine, O. Aaltonen, & A. Revonsuo (Toim.), *Mieli ja aivot: Kognitiivisen neurotieteen oppikirja* (ss. 242–251). Turun yliopisto, kognitiivisen neurotieteen tutkimuskeskus.
- Alvarez, G. A., & Cavanagh, P. (2004). The Capacity of Visual Short-Term Memory is Set Both by Visual Information Load and by Number of Objects. *Psychological Science, 15*(2), 106–111. <https://doi.org/10.1111/j.0963-7214.2004.01502006.x>
- Awh, E., & Jonides, J. (2001). Overlapping mechanisms of attention and spatial working memory. *Trends in Cognitive Sciences, 5*(3), 119–126. [https://doi.org/10.1016/S1364-6613\(00\)01593-X](https://doi.org/10.1016/S1364-6613(00)01593-X)
- Awh, E., Vogel, E. K., & Oh, S.-H. (2006). Interactions between attention and working memory. *Neuroscience, 139*(1), 201–208. <https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2005.08.023>
- Baddeley, A. (2010). Working memory. *Current Biology, 20*(4), R136–R140. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2009.12.014>
- Baddeley, A., Allen, R. J., & Hitch, G. J. (2011). Binding in visual working memory: The role of the episodic buffer. *Neuropsychologia, 49*(6), 1393–1400. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2010.12.042>
- Chun, M. M., Golomb, J. D., & Turk-Browne, N. B. (2011). A Taxonomy of External and Internal Attention. *Annual Review of Psychology, 62*(1), 73–101. <https://doi.org/10.1146/annurev.psych.093008.100427>
- Cohen, J. (1988). *Statistical power analysis for the behavioral sciences* (2nd ed). L. Erlbaum Associates.

- Cowan, N. (2001). The magical number 4 in short-term memory: A reconsideration of mental storage capacity. *Behavioral and Brain Sciences*, 24(1), 87–114.  
<https://doi.org/10.1017/S0140525X01003922>
- Doesburg, S. M., Bedo, N., & Ward, L. M. (2016). Top-down alpha oscillatory network interactions during visuospatial attention orienting. *NeuroImage*, 132, 512–519.  
<https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2016.02.076>
- ElShafei, H. A., Zhou, Y. J., & Haegens, S. (2022). Shaping Information Processing: The Role of Oscillatory Dynamics in a Working Memory Task. *Eneuro*, 9(5), ENEURO.0489-21.2022. <https://doi.org/10.1523/ENEURO.0489-21.2022>
- Eng, H. Y., Chen, D., & Jiang, Y. (2005). Visual working memory for simple and complex visual stimuli. *Psychonomic Bulletin & Review*, 12(6), 1127–1133.  
<https://doi.org/10.3758/BF03206454>
- Feldmann-Wüstefeld, T., & Vogel, E. K. (2019). Neural Evidence for the Contribution of Active Suppression During Working Memory Filtering. *Cerebral Cortex*, 29(2), 529–543.  
<https://doi.org/10.1093/cercor/bhx336>
- Gazzaniga, M. S., & Sperry, R. W. (1967). LANGUAGE AFTER SECTION OF THE CEREBRAL COMMISSURES. *Brain*, 90(1), 131–148.  
<https://doi.org/10.1093/brain/90.1.131>
- Goldenhaus-Manning, D. T., Cooper, N. R., & Loaiza, V. M. (2023). Examining the role of attention during feature binding in visuospatial working memory. *Attention, Perception, & Psychophysics*. <https://doi.org/10.3758/s13414-023-02655-y>
- Griffin, I. C., & Nobre, A. C. (2003). Orienting Attention to Locations in Internal Representations. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 15(8), 1176–1194.  
<https://doi.org/10.1162/089892903322598139>

- Gutteling, T. P., Sillekens, L., Lavie, N., & Jensen, O. (2022). Alpha oscillations reflect suppression of distractors with increased perceptual load. *Progress in Neurobiology*, 214, 102285. <https://doi.org/10.1016/j.pneurobio.2022.102285>
- Hajonides, J. E., van Ede, F., Stokes, M. G., & Nobre, A. C. (2020). Comparing the prioritization of items and feature-dimensions in visual working memory. *Journal of Vision*, 20(8), 25. <https://doi.org/10.1167/jov.20.8.25>
- Hari, R., & Puce, A. (2017). *MEG-EEG Primer* (1. p.). Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/med/9780190497774.001.0001>
- Hari, R., & Salmelin, R. (1997). Human cortical oscillations: A neuromagnetic view through the skull. *Trends in Neurosciences*, 20(1), 44–49. [https://doi.org/10.1016/S0166-2236\(96\)10065-5](https://doi.org/10.1016/S0166-2236(96)10065-5)
- Heinilä, E., & Parviainen, T. (2022). *Meggie – easy-to-use graphical user interface for M/EEG analysis based on MNE-python* [Preprint]. Neuroscience. <https://doi.org/10.1101/2022.09.12.507592>
- Hollingworth, A., & Hwang, S. (2013). The relationship between visual working memory and attention: Retention of precise colour information in the absence of effects on perceptual selection. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 368(1628), 20130061. <https://doi.org/10.1098/rstb.2013.0061>
- Hollingworth, A., & Maxcey-Richard, A. M. (2013). Selective maintenance in visual working memory does not require sustained visual attention. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 39(4), 1047–1058. <https://doi.org/10.1037/a0030238>
- Händel, B. F., Haarmeier, T., & Jensen, O. (2011). Alpha Oscillations Correlate with the Successful Inhibition of Unattended Stimuli. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 23(9), 2494–2502. <https://doi.org/10.1162/jocn.2010.21557>

- Ikkai, A., Dandekar, S., & Curtis, C. E. (2016). Lateralization in Alpha-Band Oscillations Predicts the Locus and Spatial Distribution of Attention. *PLOS ONE*, *11*(5), e0154796. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0154796>
- Jensen, O., & Mazaheri, A. (2010). Shaping Functional Architecture by Oscillatory Alpha Activity: Gating by Inhibition. *Frontiers in Human Neuroscience*, *4*. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2010.00186>
- Kiyonaga, A., Egner, T., & Soto, D. (2012). Cognitive control over working memory biases of selection. *Psychonomic Bulletin & Review*, *19*(4), 639–646. <https://doi.org/10.3758/s13423-012-0253-7>
- Klimesch, W., Sauseng, P., & Hanslmayr, S. (2007). EEG alpha oscillations: The inhibition–timing hypothesis. *Brain Research Reviews*, *53*(1), 63–88. <https://doi.org/10.1016/j.brainresrev.2006.06.003>
- Kogan, L. S. (1948). Analysis of variance-repeated measurements. *Psychological Bulletin*, *45*(2), 131–143. <https://doi.org/10.1037/h0063096>
- LaRocque, J. J., Riggall, A. C., Emrich, S. M., & Postle, B. R. (2016). Within-Category Decoding of Information in Different Attentional States in Short-Term Memory. *Cerebral Cortex*, cercor;bhw283v1. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhw283>
- Lepsien, J., Thornton, I., & Nobre, A. C. (2011). Modulation of working-memory maintenance by directed attention. *Neuropsychologia*, *49*(6), 1569–1577. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2011.03.011>
- Li, D., Hu, Y., Qi, M., Zhao, C., Jensen, O., Huang, J., & Song, Y. (2023). Prioritizing flexible working memory representations through retrospective attentional strengthening. *NeuroImage*, *269*, 119902. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2023.119902>
- Li, D., Zhao, C., Guo, J., Kong, Y., Li, H., Du, B., Ding, Y., & Song, Y. (2021). Visual Working Memory Guides Spatial Attention: Evidence from alpha oscillations and sustained

potentials. *Neuropsychologia*, 151, 107719.

<https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2020.107719>

Liang, T., Chen, X., Ye, C., Zhang, J., & Liu, Q. (2019). Electrophysiological evidence supports the role of sustained visuospatial attention in maintaining visual WM contents.

*International Journal of Psychophysiology*, 146, 54–62.

<https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2019.09.011>

Liu, R., Guo, L., Sun, H., Parviainen, T., Zhou, Z., Cheng, Y., Liu, Q., & Ye, C. (2023).

Sustained attention required for effective dimension-based retro-cue benefit in visual working memory. *Journal of Vision*, 23(5), 13. <https://doi.org/10.1167/jov.23.5.13>

Luck, S. J., & Vogel, E. K. (1997). The capacity of visual working memory for features and conjunctions. *Nature*, 390(6657), 279–281. <https://doi.org/10.1038/36846>

Makovski, T. (2012). Are multiple visual short-term memory storages necessary to explain the retro-cue effect? *Psychonomic Bulletin & Review*, 19(3), 470–476.

<https://doi.org/10.3758/s13423-012-0235-9>

Makovski, T., & Pertzov, Y. (2015). Attention and memory protection: Interactions between retrospective attention cueing and interference. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 68(9), 1735–1743. <https://doi.org/10.1080/17470218.2015.1049623>

Myers, N. E., Walther, L., Wallis, G., Stokes, M. G., & Nobre, A. C. (2015). Temporal Dynamics of Attention during Encoding versus Maintenance of Working Memory: Complementary Views from Event-related Potentials and Alpha-band Oscillations.

*Journal of Cognitive Neuroscience*, 27(3), 492–508.

[https://doi.org/10.1162/jocn\\_a\\_00727](https://doi.org/10.1162/jocn_a_00727)

Mössing, W. A., & Busch, N. A. (2020). Lateralized alpha oscillations are irrelevant for the behavioral retro-cueing benefit in visual working memory. *PeerJ*, 8, e9398.

<https://doi.org/10.7717/peerj.9398>

- Olivers, C. N. L. (2008). Interactions between visual working memory and visual attention. *Frontiers in Bioscience*, *13*(13), 1182. <https://doi.org/10.2741/2754>
- Olivers, C. N. L., Meijer, F., & Theeuwes, J. (2006). Feature-based memory-driven attentional capture: Visual working memory content affects visual attention. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *32*(5), 1243–1265. <https://doi.org/10.1037/0096-1523.32.5.1243>
- Poch, C., Campo, P., & Barnes, G. R. (2014). Modulation of alpha and gamma oscillations related to retrospectively orienting attention within working memory. *European Journal of Neuroscience*, *40*(2), 2399–2405. <https://doi.org/10.1111/ejn.12589>
- Poch, C., Capilla, A., Hinojosa, J. A., & Campo, P. (2017). Selection within working memory based on a color retro-cue modulates alpha oscillations. *Neuropsychologia*, *106*, 133–137. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2017.09.027>
- Posner, M. I., Snyder, C. R., & Davidson, B. J. (1980). Attention and the detection of signals. *Journal of Experimental Psychology: General*, *109*(2), 160–174. <https://doi.org/10.1037/0096-3445.109.2.160>
- Rerko, L., Souza, A. S., & Oberauer, K. (2014). Retro-cue benefits in working memory without sustained focal attention. *Memory & Cognition*, *42*(5), 712–728. <https://doi.org/10.3758/s13421-013-0392-8>
- Riddle, J., Scimeca, J. M., Cellier, D., Dhanani, S., & D'Esposito, M. (2020). Causal Evidence for a Role of Theta and Alpha Oscillations in the Control of Working Memory. *Current Biology*, *30*(9), 1748-1754.e4. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2020.02.065>
- Rösner, M., Arnau, S., Skiba, I., Wascher, E., & Schneider, D. (2020). The spatial orienting of the focus of attention in working memory makes use of inhibition: Evidence by hemispheric asymmetries in posterior alpha oscillations. *Neuropsychologia*, *142*, 107442. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2020.107442>

- Sauseng, P., Klimesch, W., Stadler, W., Schabus, M., Doppelmayr, M., Hanslmayr, S., Gruber, W. R., & Birbaumer, N. (2005). A shift of visual spatial attention is selectively associated with human EEG alpha activity. *European Journal of Neuroscience*, *22*(11), 2917–2926. <https://doi.org/10.1111/j.1460-9568.2005.04482.x>
- Schmidt, B. K., Vogel, E. K., Woodman, G. F., & Luck, S. J. (2002). Voluntary and automatic attentional control of visual working memory. *Perception & Psychophysics*, *64*(5), 754–763. <https://doi.org/10.3758/BF03194742>
- Schneider, D., Göddertz, A., Haase, H., Hickey, C., & Wascher, E. (2019). Hemispheric asymmetries in EEG alpha oscillations indicate active inhibition during attentional orienting within working memory. *Behavioural Brain Research*, *359*, 38–46. <https://doi.org/10.1016/j.bbr.2018.10.020>
- Schneider, D., Mertes, C., & Wascher, E. (2015). On the fate of non-cued mental representations in visuo-spatial working memory: Evidence by a retro-cuing paradigm. *Behavioural Brain Research*, *293*, 114–124. <https://doi.org/10.1016/j.bbr.2015.07.034>
- Shepherdson, P., Oberauer, K., & Souza, A. S. (2018). Working memory load and the retro-cue effect: A diffusion model account. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *44*(2), 286–310. <https://doi.org/10.1037/xhp0000448>
- Sligte, I. G., Scholte, H. S., & Lamme, V. A. F. (2008). Are There Multiple Visual Short-Term Memory Stores? *PLoS ONE*, *3*(2), e1699. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0001699>
- Souza, A. S., & Oberauer, K. (2016). In search of the focus of attention in working memory: 13 years of the retro-cue effect. *Attention, Perception, & Psychophysics*, *78*(7), 1839–1860. <https://doi.org/10.3758/s13414-016-1108-5>
- Souza, A. S., Rerko, L., & Oberauer, K. (2014). Unloading and reloading working memory: Attending to one item frees capacity. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *40*(3), 1237–1256. <https://doi.org/10.1037/a0036331>



- Souza, A. S., Rerko, L., & Oberauer, K. (2016). Getting more from visual working memory: Retro-cues enhance retrieval and protect from visual interference. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 42(6), 890–910.  
<https://doi.org/10.1037/xhp0000192>
- Sperling, G. (1960). The information available in brief visual presentations. *Psychological Monographs: General and Applied*, 74(11), 1–29. <https://doi.org/10.1037/h0093759>
- Ter Huurne, N., Onnink, M., Kan, C., Franke, B., Buitelaar, J., & Jensen, O. (2013). Behavioral Consequences of Aberrant Alpha Lateralization in Attention-Deficit/Hyperactivity Disorder. *Biological Psychiatry*, 74(3), 227–233.  
<https://doi.org/10.1016/j.biopsych.2013.02.001>
- Treisman, A. (1996). The binding problem. *Current Opinion in Neurobiology*, 6(2), 171–178.  
[https://doi.org/10.1016/S0959-4388\(96\)80070-5](https://doi.org/10.1016/S0959-4388(96)80070-5)
- Vandenbroucke, A. R. E., Sligte, I. G., De Vries, J. G., Cohen, M. X., & Lamme, V. A. F. (2015). Neural Correlates of Visual Short-term Memory Dissociate between Fragile and Working Memory Representations. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 27(12), 2477–2490. [https://doi.org/10.1162/jocn\\_a\\_00870](https://doi.org/10.1162/jocn_a_00870)
- Vicente-Grabovetsky, A., Carlin, J. D., & Cusack, R. (2014). Strength of Retinotopic Representation of Visual Memories is Modulated by Strategy. *Cerebral Cortex*, 24(2), 281–292. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhs313>
- Worden, M. S., Foxe, J. J., Wang, N., & Simpson, G. V. (2000). Anticipatory Biasing of Visuospatial Attention Indexed by Retinotopically Specific  $\alpha$ -Band Electroencephalography Increases over Occipital Cortex. *The Journal of Neuroscience*, 20(6), RC63–RC63. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.20-06-j0002.2000>
- Ye, C., Hu, Z., Ristaniemi, T., Gendron, M., & Liu, Q. (2016). Retro-dimension-cue benefit in visual working memory. *Scientific Reports*, 6(1), 35573.  
<https://doi.org/10.1038/srep35573>

Ye, C., Xu, Q., Liu, X., Astikainen, P., Zhu, Y., Hu, Z., & Liu, Q. (2021). Individual differences in working memory capacity are unrelated to the magnitudes of retrocue benefits.

*Scientific Reports*, *11*(1), 7258. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-86515-5>

Zhao, C., Kong, Y., Li, D., Huang, J., Kong, L., Li, X., Jensen, O., & Song, Y. (2023).

Suppression of distracting inputs by visual-spatial cues is driven by anticipatory alpha activity. *PLOS Biology*, *21*(3), e3002014. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.3002014>