

Aus der Klinik und Poliklinik für Hals-, Nasen- und Ohrenheilkunde
Universitätsklinikum der Technischen Universität Dresden
Direktor: Herr Prof. Dr. med. Dr. h.c. Thomas Zahnert

Die Auswirkungen der Wahrnehmung in virtueller Realität durch
olfaktorische Stimulation

Dissertationsschrift

Zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Medizin

Doctor medicinae (Dr. med.)

vorgelegt

der Medizinischen Fakultät Carl Gustav Carus

der Technischen Universität Dresden

von

Wiebke Bunzenthal

Aus Göttingen

Dresden 2023

1. Gutachter:

2. Gutachter:

Tag der mündlichen Prüfung:

gez.: _____

Vorsitzender der Promotionskommission

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	III
Abbildungsverzeichnis.....	V
Tabellenverzeichnis.....	VI
Abkürzungsverzeichnis.....	VII
1. Einleitung	1
1.1 VR-Umgebung und Geruch	4
1.2 VR-Umgebungen und Gedächtnis	5
1.3 VR-Umgebungen und EEG.....	7
1.3.1 Auswirkungen von olfaktorischen Reizen in VR-Umgebungen auf die EEG-Aktivität.....	8
2. Theoretischer Hintergrund.....	10
2.1 Der Geruchssinn.....	10
2.2 EEG.....	14
2.2.1 Elektroenzephalografie:	14
2.2.2 Frequenzbereiche im EEG.....	15
3. Motivation der Arbeit.....	17
4. Material und Methoden.....	18
4.1 Proband*innen und Teilnahmekriterien	18
4.2 Studiendesign.....	19
4.3 Experimenteller Aufbau	20
4.3.1 Ablauf und Durchführung	20
4.3.2 Telefonat zur erneuten Befragung der Proband*innen	26
4.4 Methoden	27
4.5 Datenanalyse der Fragebögen	29
4.5.1 Datenanalyse der EEG-Daten.....	33
5. Ergebnisse	34
5.1 Basisdaten der Studienteilnehmer und deskriptive Statistik	34

5.2 Auswirkungen von Kongruenz und Inkongruenz auf die Wahrnehmung der VR-Umgebung.....	35
5.3 Auswirkungen der Gedächtnisleistung auf die Wahrnehmung in VR-Umgebungen ...	42
5.4 Auswirkungen der olfaktorischen Stimulation in VR-Umgebungen auf das EEG.....	46
6. Diskussion.....	47
6.1 Diskussion der Ergebnisse	47
6.1.1 Wahrnehmung der VR-Umgebung unter kongruenten Bedingungen	47
6.1.2 Einfluss der Gedächtnisleistung auf Wahrnehmung der VR-Umgebung.....	51
6.1.3 Spezifische EEG-Veränderungen in VR-Umgebungen	54
6.2 Diskussion der Methoden	55
6.3 Limitationen und Herausforderungen.....	56
6.4 Ausblick.....	59
7. Zusammenfassung.....	61
7. Summary.....	64
8. Literaturverzeichnis	64
9. Anhang.....	81
Danksagung	Fehler! Textmarke nicht definiert.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Eigene Darstellung der zentralen Verarbeitung olfaktorischer Sinneseindrücke	13
Abbildung 2: Ablauf des Versuchs	19
Abbildung 3: Videos, die den Proband*innen vorgespielt wurden	20
Abbildung 4: Auswahl der jeweiligen Duftstoffe	22
Abbildung 5: Probandin mit angebrachten 64-Kanal-EEG, VR-Brille sowie Kopfhörer auf dem Versuchsstuhl.....	24
Abbildung 6: Sniffin‘ Sticks Identifikationstest	28
Abbildung 7: Darstellung der individuellen Bedingungen	32
Abbildung 8: Subjektive Wahrnehmung von Kongruenz und Inkongruenz der präsentierten Gerüche	35
Abbildung 9: Tulpenfeld: Wahrnehmung der Intensität unter kongruenten und inkongruenten Bedingungen	37
Abbildung 10: Verlorene Orte: Empfundene Gefälligkeit und Vertrautheit unter kongruenten und inkongruenten Bedingungen	38
Abbildung 11: Kaffeehaus: Empfundene Gefälligkeit, Aufgeregtheit Vertrautheit und Intensität unter kongruenten und inkongruenten Bedingungen.....	39
Abbildung 12: Empfundene Gefälligkeit, Unterhaltsamkeit sowie Alarmiertheit unter objektiv kongruenten und inkongruenten Bedingungen	40
Abbildung 13: Das Sternennachts-Video: Wahrgenommene Intensität des Geruchs unter subjektiv empfundener Kongruenz bzw. Inkongruenz.....	41
Abbildung 14: Verlorene Orte: Irritation bezogen auf eine objektiv bessere bzw. eine objektiv schlechtere Gedächtnisleistung.....	42
Abbildung 15: Küstenexpedition: Bereitschaft, das Video erneut zu schauen in Relation zu der objektiv besseren bzw. schlechteren Gedächtnisleistung	43
Abbildung 16: Die Sternennacht: Hohes bzw. niedrigeres subjektives Erinnerungsvermögen und die Auswirkung auf Aufgeregtheit, Unterhaltsamkeit und Alarmiertheit	44

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Ein- und Ausschlusskriterien	18
Tabelle 2: Einteilung der Gruppen mit entsprechend präsentierten Gerüchen	23
Tabelle 3: Fragen zu den einzelnen Videos	25
Tabelle 4: Drei-Komponenten-Identifikationstest Sniffin' Stick inclusive der Distraktoren....	28
Tabelle 5: Ausgewählte Fragen zur Auswertung des Erinnerungsvermögens	30
Tabelle 6: Altersverteilung der Proband*innen.....	34
Tabelle 7: Subjektiv empfundene Kongruenz der einzelnen Videos und Gerüche	35
Tabelle 8: Ergebnisdarstellung für die einzelnen Frequenzbereiche des EEGs	46

Abkürzungsverzeichnis

Ag	Argentum / Silber
AgCl	Argentum Chlorid / Silberchlorid
ANCOVA	Kovarianzanalyse / Analysis of Covariance
CAVE	Computer-Aided Virtual Environment
DFT	Diskrete Fourier-Transformation
EEG	Elektroenzephalogramm
FFT	schnelle Fourier-Transformation
fMRT	funktionelle Magnetresonanztomografie
GABA	γ -Aminobuttersäure / Gamma-Aminobutyric acid
HNO	Hals-Nasen-Ohrenheilkunde
Hz	Hertz
IDFT	Inverse diskrete Fourier-Transformation
M.	Morbus
med.	medial
MoCA	Montreal Cognitive Assesment
Ncl.	Nucleus
ORN	olfaktorische Rezeptorneurone
PANAS	Positive and Negative Affect Schedule
PET	Positronen-Emissions-Tomografie
VR	Virtual Reality / Virtuelle Realität / VR
ZNS	Zentrales Nervensystem

Die im deutschen Sprachraum üblicherweise verwendeten Abkürzungen und Maßeinheiten sind hier nicht aufgeführt.

1. Einleitung

Die Wahrnehmung der Welt ist geprägt durch unsere fünf Sinne. Wir erleben unsere Umgebung durch taktile, optische, akustische, gustatorische und olfaktorische Reize. Dieses Zusammenspiel von Sinnesmodalitäten und Wahrnehmung schafft unsere Realität.

Seit den späten dreißiger Jahren des vergangenen Jahrhunderts entstand zusätzlich zu der klassischen Vorstellung von Realität die Vorstellung einer virtuellen Realität.

Geprägt wurde der Begriff virtuelle Realität das erste Mal im Jahr 1938 durch Artaud.

Dieser verwendete ihn in seinem Buch *Le Théâtre et son double* und meinte mit virtueller Realität vor allem die Illusion des Theaters. Die englische Übersetzung erschien 1959. Somit wurde das erste Mal Mitte des 20. Jahrhunderts von „Virtual Reality“ gesprochen (Artaud, 1938).

Um die virtuelle Realität des Theaters für das Publikum noch realistischer zu gestalten, schrieb Heilig 1955 ein Theaterstück, welches ein multisensorisches Sinneserlebnis für die Zuschauenden werden sollte. Hierfür entwickelte er 1962 das sogenannte „Sensorama“, in welchem er die Besucher*innen virtuell Motorrad durch New York fahren ließ. Das Sensorama sollte sowohl audiovisuelle Reize setzen als auch olfaktorische und taktile Sinneseindrücke vermitteln. Hierfür nutze er zum einen Farb- und Gerüche, zum anderen aber auch taktiles Erleben, welches durch Wind aus Ventilatoren simuliert wurde. Morton Heilig hatte also schon 1962 verstanden, dass erlebte Realität nicht nur durch einen einzigen sensorischen Reiz geschaffen werden kann.

Heutzutage schafft Virtuelle Realität (VR) eine computersimulierte, realistische, interaktive, dynamische und multidimensionale Umgebung, die das echte Leben simulieren kann (Mazza et al., 2021).

VR ist gegenwärtig über drei verschiedenen Methoden erlebbar. Es gibt Desktop-VR, Headset-VR und Simulator-VR (Smith, 2019).

Desktop-VR ist erfahrbar über einen Monitor, welcher über eine Maus steuerbar ist. Die Vorteile dieser Technik sind, dass sie meist recht kostengünstig und den Benutzer*innen vertraut ist. Ein Nachteil ist jedoch, dass die Wiedergabe häufig nur in 2-D stattfindet und die Handlung in der Desktop-VR nicht der Handlung im echten Leben entspricht (Smith, 2019).

Die Headset-VR ist ein als Brille designtes Display, welches die Kopfbewegung des Zuschauenden aufnimmt, einen Großteil der Eindrücke aus der äußeren Umgebung beseitigt und neue Eindrücke innerhalb der inneren Umgebung entstehen lässt (Herz, 2021). Zusätzlich gibt es bei dieser Form häufig die Möglichkeit mit einem zusätzlichen Controller, welcher über die Hände gesteuert wird, in der virtuellen Welt zu interagieren. In den letzten Jahren wurde diese Technik durch die Integration von Smartphones in vorbestehende Halterungen

erleichtert, wodurch eine höhere Mobilität erreicht wurde. Vorteile der Headset-VR sind, dass sich Bewegungsabläufe wie zum Beispiel Kopfbewegungen deutlich besser integrieren lassen und die Umgebung dadurch realistischer wirkt. Jedoch sind weitere Bewegungsabläufe wie translatorische Bewegungen, also Vorwärts- oder Seitwärtsbewegung nicht ohne Weiteres darstellbar (Smith, 2019).

Die Simulator VR unterscheidet sich von der Headset-VR vor allem durch externe Displays, welche die Versuchsperson umgeben und spezielle Eingabegeräte, welche auch Bewegungen erfassen und haptisches Feedback erzeugen können. Unter diese Kategorie fallen sehr unterschiedliche Systeme. Die realistischste Erfahrung bieten aktuell sogenannte CAVE-Systeme, wobei CAVE für Computer-Aided Virtual Environment steht. CAVEs sind oft als Raum konzipiert, in denen sich die Person durch Headtracking und andere Eingabegeräte auf natürliche Art und Weise bewegen kann. Simulator-VR wird häufig zu Trainingszwecken für komplexe Lernaufgaben verwendet. So können zum Beispiel Flug- oder auch OP-Simulationen geschaffen werden, in denen prozedurales Lernen stattfindet (Smith, 2019).

Die Unterscheidung der Methoden ist nicht trivial, da unterschiedliche VR-Simulatoren unterschiedliche Studienergebnisse hervorbringen (Smith, 2019).

Allen Systemen gemein ist jedoch, dass sie eine sensorische und psychologische Wirklichkeit schaffen und somit ein Präsenzgefühl vermitteln (Herz, 2021). Es wird eine Illusion geschaffen, in der die äußere physische Umgebung aus dem immanenten Bewusstsein des Benutzers verdrängt wird (Lombard & Ditton, 1997; Riva et al., 2007; Riva & Waterworth, 2003).

Um zu verstehen, wie der Eindruck von Realität im Virtuellen entsteht, lohnt es sich, die Begriffe Präsenz und Immersion genauer anzuschauen.

Der angestrebte Zustand in der VR ist das Empfinden von Anwesenheit oder auch Präsenz (Herz, 2021). Das Gefühl von Präsenz ist ein komplexer psychologischer Zustand, in welchem vielschichtige Interaktion zwischen sensorischer Stimulation und den daraus resultierenden kognitiven Reaktionen entstehen (Herz, 2021; Spagnolli & Gamberini, 2005).

Immersion stellt im Kontext von virtueller Realität das Ausmaß dar, in dem ein VR-System eine naturalistische Darstellung der sensorischen und interaktiven Elemente einer gegebenen virtuellen Umgebung erzeugt (Smith, 2019).

Das Eintauchen in VR-Umgebungen wird durch spezielle Schnittstellengeräte erschaffen, die mit der virtuellen Umgebung interagieren. Das heißt, die Immersion wird durch Technologie erreicht (Engelmann, 2018) und das Präsenzgefühl ist die psychologische Manifestation des Aufenthalts in einer VR-Umgebung (Baus et al., 2019; Herz, 2021).

Wie oben schon beschrieben ist die Wahrnehmung unserer Realität jedoch geprägt durch unsere fünf Sinne. Dazu gehören taktile, optische, akustische, gustatorische und olfaktorische

Reize. Daraus resultiert, dass für ein hohes Präsenzgefühl alle Sinne stimuliert werden müssen. Dies bestätigten Auvray und Spence (2008). Sie fanden Hinweise, dass ein gutes Essen nicht alleine durch den Geschmack zu einem guten Essen wird. Auch Konsistenz, Aussehen, Geruch und sogar Geräusche während des Essens führen zu einem vollumfänglichen Erleben. Es benötigt also multimodale sensorische Reizaktivierung um ein Erlebnis präsent, real und angenehm erscheinen zu lassen. (Auvray & Spence, 2008).

Immersive VR schafft eine dreidimensionale (3D) Illusion der Realität, bei der die äußere Welt durch die virtuelle Welt ersetzt wird (Rizzo & Shilling, 2017). Das Ziel der immersiven Technologie ist es, die Realität in allen sensorischen Bereichen zu imitieren; daher muss die Realität multisensorisch nachgeahmt werden (Hruby, 2019; Slater, Wilbur, 1997). Bisher beschränkten sich immersive VR-Umgebungen vor allem auf visuelle und auditive Stimulationen (Herz, 2021).

Der technische Fortschritt konzentrierte sich in den letzten Jahren vor allem auf die Verbesserung von visuellen Reize. Die Eigenschaft der visuellen Wiedergabetreue ist definiert als die Genauigkeit, mit der ein VR-System die sichtbaren Eigenschaften und Details analoger visueller Informationen aus der realen Welt reproduziert (Smith, 2019). Je näher die sensorischen Reize der Realität kommen, desto höher ist das Präsenzgefühl (Dinh et al., 1999).

Rauchs und Kolleg*innen fanden 2008 heraus, dass je höher die Detailgenauigkeit der visuellen Reize in der VR-Umgebung ist, desto effizienter und genauer konnten Teilnehmende die erworbenen Kenntnisse auch in der realen Welt einsetzen. Hierfür ließen sie Proband*innen einen Weg in einer VR-Umgebung lernen und später den Weg in der realen Welt navigieren.

Ein hohes Realitätserleben geht jedoch nicht allein mit der detailgetreuen Abbildung von Objekten einher, sondern mit einer möglichst realistischen neuronalen Aktivierung, die durch multisensorisches Erleben moduliert wird (Gallace et al., 2012). Je mehr sensorische Einflüsse das Erlebte modulieren, desto höher sind sowohl das Präsenzgefühl als auch die Erinnerungen an das Erlebte (Dinh et al., 1999).

Heutzutage sind VR-Technologien in der Lage, die Stimulation aller fünf Sinne einzubeziehen (Flavián et al., 2021). Durch eine Kombination aus dreidimensionalen visuellen, taktilen, auditiven und olfaktorischen Reizen sowie durch Trackingsystemen, die Bewegungen integrieren, wird ein hohes Maß an Immersion erzeugt (Mazza et al., 2021).

Um einen besseren Eindruck zu gewinnen, wie genau diese unterschiedlichen Sinneseindrücke in die VR-Umgebung integriert werden und somit ein höheres Maß an

Immersion und Präsenz zu schaffen, sind im Folgenden die unterschiedlichen Möglichkeiten beschrieben.

Die visuellen und stereoskopischen Darstellungen in VR-Umgebungen sind bereits oben beschrieben und werden hier nicht erneut genannt.

Naheliegend, einfach umzusetzen und in multisensorischen VRs bisher am häufigsten benutzt, ist der Hörsinn. Auditive Sinneseindrücke lassen sich vielfältig und mit der heutigen Technik kostengünstig vermitteln. Hierfür werden integrierte Lautsprecher oder auch Kopfhörer genutzt, welche eine adäquate Methode bieten, die VR-Umgebung durch auditive Reize zu ergänzen.

Schwieriger, aufwendiger und bisher kaum verwendet sind hingegen taktile Reize. Sie lassen sich nur durch aufwändigere VR-Simulationen erzeugen. So benutzen Dinh und Kolleg*innen 1999 einen Ventilator und eine Wärmelampe, um Proband*innen einen Balkon in der Sonne zu fingieren. Je nach Einsatzgebiet, Fragestellung und VR-Methode sind die Möglichkeiten und Methoden unterschiedlich. Bewegungen werden in VR vor allem durch Trackingsysteme mit Infrarotkameras und Tiefensensoren oder durch Handschuhe oder Bodysuits integriert. Die Integration von haptischen Reizen ist jedoch technisch noch nicht voll ausgereift, da insbesondere das breite Spektrum an taktilen und propriozeptiven Hinweisen eine Herausforderung darstellt (McAnally & Wallis, 2022; van Wegen et al., 2023).

Um Gerüche in der VR zu vermitteln und somit auch den Geruchssinn zu stimulieren, werden heutzutage vor allem VR-Headset und ein Nasenstücksystem mit integrierter Geruchsabgabe- und Luftstromtechnologie verwendet (Herz, 2021). Problematisch ist jedoch, dass die Mehrzahl der heute auf dem Markt verfügbaren Geräte ebenfalls kostspielig und für Laien schwer zu bedienen sind (Risso et al., 2018).

1.1 VR-Umgebung und Geruch

Gerüche stellen nicht nur eine Schlüsselkomponente der gelebten Erfahrung dar, sondern sind auch besonders emotionale Reize (Herz & Schooler, 2002). Gerüche können die Aufmerksamkeit lenken, das Präsenzgefühl erhöhen und so für einen besseren mentalen Zustand sorgen (Chen, 2006).

Auch zeigte sich, dass olfaktorische Reize in der Lage sind, die Hedonik einer Situation zu modulieren (Demattè et al., 2007; Locke & Grimm, 1949). So wiesen mehrere Studien darauf hin, dass insbesondere die Kongruenz und Inkongruenz eine Rolle bei der Wahrnehmung der Umgebung spielt. Im Speziellen konnte gezeigt werden, dass Kongruenz von Geruch und Umgebung zu einer positiveren Wahrnehmung führen (Baus et al., 2019; Liu et al., 2019; Micaroni et al., 2019; Niedenthal et al., 2019; Rihm et al., 2014; Seo et al., 2014; Seo & Hummel, 2011; Streeter & White, 1986).

Kongruente Sinneserfahrungen führen für gewöhnlich zu einer verbesserten Leistung (Rihm et al., 2014; Seo et al., 2010, 2014; Seo & Hummel, 2011), wohingegen inkongruente Sinneserfahrungen die Leistungsfähigkeit einschränken (Niedenthal et al., 2019; Streeter & White, 1986). Wie sehr eine Erfahrung emotional vertieft wird, hängt davon ab, wie angenehm die Sinneserfahrung erlebt wird (Cabanac, 2002). Als besonders entscheidend für das Gefühl der Gefälligkeit hat sich die Kongruenz der Sinneserfahrungen gezeigt (Seo et al., 2014). Ein Teilaspekt der Studie konzentriert sich auf die Auswirkungen von Kongruenz und Inkongruenz auf die Wahrnehmung von VR-Umgebungen, um diese weiter zu untersuchen.

1.2 VR-Umgebungen und Gedächtnis

Um nachvollziehen zu können, welche Relevanz VR heutzutage hat, ist es sinnvoll, sich die aktuellen Einsatzgebiete von virtueller Realität anzuschauen.

VR wird heute breit eingesetzt und ist ein essenzieller Bestandteil in multiplen Bereichen. Angewendet wird es im Freizeitbereich, beim Gaming, der Industrie, aber auch beim Lernen von neuen Abläufen oder Fertigkeiten sowie im medizinischen Bereich, zum Beispiel bei der Behandlung traumatisierter Menschen. VR-Umgebungen können sowohl Kognition, Gehirnaktivität, Aufmerksamkeit, aber auch physiologische Reaktionen und sogar den Affekt beeinflussen (Mazza et al., 2021).

Besonderes Interesse an VR hat die experimentelle Psychologie. Oft bereiten die ökologische Validität und der Grad der experimentellen Kontrolle Probleme beim Studiendesign (Kvavilashvili & Ellis, 2004). VR-Umgebungen bieten jedoch die Möglichkeit, durch eine realistische Imitation der Realität eine hohe ökologische Validität zu schaffen. Durch die künstliche Umgebung können Laboreindrücke überwunden werden (Mazza et al., 2021). Gleichzeitig kann jedoch die experimentelle Kontrolle aufrechterhalten werden, die für die zuverlässige Bewertung eines bestimmten psychologischen Konstrukts erforderlich ist (Smith, 2019). Durch die streng kontrollierbaren Bedingungen, die Standardisierungsmöglichkeiten und die Wiederholbarkeit ohne räumliche oder zeitliche Einschränkungen dient VR als leistungsstarkes Instrument. So birgt sie das Potenzial, Labor- und klinische Methoden bezüglich Effektstärke zu übertreffen (Mazza et al., 2021).

Virtuelle Umgebungen können so geschaffen werden, dass sie eine theoretisch unendliche Anzahl von Situationen widerspiegeln, und zwar auf eine Art und Weise, die deutlich kosteneffizienter ist als die Schaffung ihrer realen Entsprechung (Smith, 2019).

Obwohl in den letzten Jahren viel zu VR-Umgebungen in Bezug auf Wissenserwerb und Gedächtnisleistung geforscht wurde, sind Abläufe von Lernprozessen in VR-Umgebungen und die Übertragbarkeit in reale Situationen noch nicht vollständig verstanden (Smith, 2019). Die Forschung konzentrierte sich in den letzten Jahren insbesondere darauf, inwieweit VR-

Umgebungen eine adäquate Möglichkeit bieten, experimentelle Studien in realen Situationen zu ersetzen und inwieweit diese dort gewonnen Ergebnisse und Lerninhalte auf echte Konditionen und Situationen übertragbar waren (Harman et al., 2017; Schöne et al., 2019; Smith & Mulligan, 2021). Ein weiterer Fokus der Forschung lag darauf, welche Einflussfaktoren Lernen und Gedächtnis positiv beeinflussen können.

Im Hinblick auf VR-Umgebungen konnte gezeigt werden, dass eine erhöhte Immersion und ein höherer Präsenzsinn mit einer besseren Gedächtnisleistung einhergeht (Smith, 2019; Smith & Mulligan, 2021). Wenn man sich in Erinnerung ruft, wie Immersion erzeugt wird, nämlich durch eine Kombination visueller, taktile, auditiver und olfaktorischer Reize, kann man sich vorstellen, dass die multisensorische Aktivierung zu einer besseren und effektiveren Verknüpfung im Hirn führt.

Analog hierzu weiß man, dass Gedächtnis und Geruch in direkter Beziehung zueinanderstehen und sich somit beeinflussen (Dinh et al., 1999; Moore et al., 2015; Tortell et al., 2007). Gerüche und Geschmäcker können Erinnerungen unmittelbar präsent erscheinen lassen. Dieser Effekt wird Proust-Phänomen genannt (Toffolo et al., 2012). Außerdem weiß man, dass durch Geruch ausgelöste Erinnerungen emotional stärker vernetzt sind als zum Beispiel durch Worte oder Bilder ausgelöste Erinnerungen. Sie können dadurch eine höhere Emotionalität auslösen (Herz & Cupchik, 1995; Herz & Engen, 1996; Herz et al., 2004). So fühlten sich Proband*innen stärker in die Vergangenheit versetzt, die durch Gerüche an Ereignisse erinnert wurden, als wenn dies durch verbale Reize geschah (Willander & Larsson, 2006).

Auch Gallace und Kolleg*innen fanden, dass zusätzliche olfaktorische Reize in VR-Umgebungen die Immersion und somit das Präsenzgefühl steigern, was im gleichen Maße zu einer Erhöhung des Unterhaltungswerts und des Erinnerungsvermögens führt (Gallace et al., 2012).

Auch Toffolo und Kolleg*innen (2012) untersuchten das Gedächtnis in Bezug auf verschiedene sensorische Reize.

Die Teilnehmenden bekamen einen aversiven Film gezeigt und waren währenddessen olfaktorischen, visuellen und auditiven Reizen ausgesetzt. Eine Woche später wurden die Proband*innen erneut einem der drei Reize ausgesetzt und gebeten, sich an Details aus dem Film zu erinnern. Diejenigen, welche den olfaktorischen Reizen ausgesetzt waren, erinnerten sich detailreicher. Zudem waren die Erinnerungen unangenehmer und erregender.

Und auch Dinh und Kolleg*innen konnten 1999 zeigen, dass zusätzliche taktile, olfaktorische und auditive Informationen das Erinnerungsvermögen in VR zum Positiven beeinflussen. Hierfür simulierten sie den Teilnehmenden eine Büroumgebung. Als auditive Hinweise dienten

Ventilatorengeräusche, Spülgeräusche einer Toilette oder Geräusche einer Stadt. Taktile Hinweise wurden durch einen Ventilator erzeugt und als olfaktorischer Hinweis diente Kaffeegeruch, der über eine kleine Sauerstoffmaske zugeführt wurde. Zusätzlich zu dem Präsenzgefühl verbesserte sich auch das Erinnerungsvermögen der Teilnehmenden.

Dies kann jedoch nicht für Lern- und Gedächtnisprozesse im Allgemeinen angenommen werden. Moore et al. (2015) erforschten die Auswirkungen von zusätzlichen olfaktorischen Einflüssen in VR auf das prozedurale Lernen. Es zeigte sich, dass unangenehme Düfte das prozedurale Lernen im Gegensatz zum semantischen Lernen eher behinderten. So machten Proband*innen beim Zusammenbauen eines Fliegers signifikant mehr Fehler, wenn dabei ein unangenehmer Geruch präsentiert wurde. Dies interpretierten die Autoren dahingehend, dass ein unangenehmer Duft ablenkender ist als ein angenehmer und somit die Encodierung zu lernender Inhalte einschränkt.

Man konnte also zeigen, dass die Wahrnehmung von VR-Umgebungen Einfluss auf das Gedächtnis hat. Andersherum gibt es zum jetzigen Zeitpunkt noch keine Forschung, die sich mit den Auswirkungen des Gedächtnisses auf die Wahrnehmung in VR-Umgebungen beschäftigt hat. Ein Teilaspekt der Studie widmet sich der Frage, ob Effekte auf die Wahrnehmung abhängig von der Gedächtnisleistung messbar sind.

1.3 VR-Umgebungen und EEG

Um besser zu verstehen, was in unseren Gehirnen in VR-Umgebungen während olfaktorischer Stimulation geschieht, braucht es psychophysiologische Untersuchungsmethoden wie zum Beispiel die Elektroenzephalografie (EEG) (Tauscher et al., 2019). Das EEG bietet die Möglichkeit, Gehirnaktivität sichtbar zu machen und kognitive Prozesse bzw. Veränderungen zu erfassen (Tauscher et al., 2019). Obwohl man weiß, wie komplex die zentralen Abläufe der olfaktorischen Wahrnehmung sind, hat bisher die Messung der kognitiven Prozesse relativ wenig Beachtung gefunden. Das EEG bietet die Möglichkeit, die Hirn-Aktivität sichtbar zu machen und ein besseres Verständnis zu erlangen, welche Effekte olfaktorische Stimulierung auslösen. Hierbei dient das EEG als zuverlässiges zeitliches Messinstrument für die Reaktion des ZNS auf sensorische Reize (Martin, 1998).

1.3.1 Auswirkungen von olfaktorischen Reizen in VR-Umgebungen auf die EEG-Aktivität

Eine Reihe von Studien konnte mittlerweile zeigen, dass olfaktorische Stimulation Veränderungen der Hirn-Aktivität im EEG hervorrufen (Lorig & Schwartz, 1988; Martin, 1998; Mancini et al., 2021). Häufig wird über Veränderungen der Aktivitätsmuster im EEG berichtet, jedoch variieren die Frequenzbereiche, in welchen die Veränderungen auftreten, von Studie zu Studie. So berichten Moruzzi und Magoun (1949), dass eine sensorische Stimulation häufig zu einer Abnahme der Theta-Wellen (4-7 Hz) führt, was sie als Abnahme von Entspannung deuteten. Lorig & Schwartz (1988) hingegen zeigten mithilfe einer Periodenanalyse, dass bestimmte Lebensmittelgerüche eine gesteigerte Aktivität der Theta-Wellen hervorrufen. Die gesteigerte Aktivität ging mit berichteter Selbsterfahrung von Entspannung einher.

Es kann davon ausgegangen werden, dass ein erheblicher Teil der Variabilität der Daten durch methodische Unterschiede verursacht ist (Martin, 1998). Divergierende EEG-Aufzeichnungsgeräte, multiple Düfte sowie unterschiedlich starke und intensive Düfte führen zu Problemen bei der Vergleichbarkeit und Deutung der Resultate (Martin, 1998).

Ein weiteres Beispiel für sich widersprechende bzw. nicht übereinstimmende Ergebnisse bietet die Alpha-Wellen Aktivität. 1962 konnte Moncreiff zeigen, dass EEG-Aktivität im Alpha-Wellenbereich, welcher 8-13 Hz entspricht, während olfaktorischer Stimulation abnahm. Dies wurde später als Hinweis für die gesteigerte Aufmerksamkeit und eine erhöhte kognitive Aktivität gewertet (Yingling, 1980).

Die Abnahme der Alpha-Wellen konnten Lorig und Kolleg*innen 1991 bestätigen. Allerdings hatten Lorig & Schwartz 1988, also nur drei Jahre zuvor, keine EEG-Veränderungen im Alpha-Wellenbereich gefunden, genau wie 1992 Klemm und Kolleg*innen.

Neuere Forschungsergebnisse weisen darauf hin, dass olfaktorische Stimulation Veränderungen in jedem Frequenzbereich hervorrufen. 2016 konnten Perl und Kolleg*innen sogar zeigen, dass olfaktorische Stimulation Einfluss auf die Delta-Wellen Aktivität hat. Zur Erinnerung: Delta-Wellen sind Frequenzen von kleiner oder gleich vier Hertz. Sie treten vor allem im Tiefschlaf auf oder bei pathologischen Veränderungen. Es gibt Hinweise, dass die Theta-Oszillation am stärksten durch olfaktorische Stimuli beeinflusst wird (Martin, 1998) und in neueren Studien konnten spezifischere Veränderungen insbesondere im piriformen Cortex gemessen werden (Jiang et al., 2017). Hierzu verwendeten Jiang und Kolleg*innen eine intrakranielle EEG-Ableitung. Die Ergebnisse sprachen dafür, dass Geruchswahrnehmung und Erkennung sowohl Beta-, Gamma- als auch Theta-Wellen induziert, wobei die einzelnen Wellenbereiche durch unterschiedliche zeitliche Dynamik gekennzeichnet sind. Die Theta-Oszillation konnte in den ersten 500 ms. gemessen werden, während die Beta- und Gamma-

Wellen erst bei der Ausatmung sichtbar wurden. Dies lässt darauf schließen, dass die Beta- und Gammawellen eher an der Diskrimination der Gerüche beteiligt sind. Interessant in diesem Zusammenhang ist, dass eine Zunahme von Theta-Wellen beobachtet wurden, wenn ein Duft detektiert werden sollte. Dies könnte bedeuten, dass die Theta-Aktivität mit olfaktorischen Aufmerksamkeitszuständen verknüpft ist.

In der jüngeren Vergangenheit beschäftigen sich Forschende auch mit den speziellen Wirkungen von ausgewählten Düften. So konnte Orchideen-Duft die Alpha-Aktivität und die Beta-Aktivität steigern, wohingegen Rosen-Duft eher Effekte im Beta-Wellen-Bereich zeigte (Kim, 2016).

Mancini und Kolleg*innen (2021) fanden in VR-Umgebungen ebenfalls spezifische Effekte während der Verabreichung von unterschiedlichen Duftstoffen im EEG. Die Daten ließen darauf schließen, dass Teilnehmende während der gleichzeitigen Verabreichung von Lavendelduft mehr kognitive Ressourcen zur Lösung einer Aufgabe benötigten als während der Verabreichung von Zitronenduft. Die Autoren mutmaßten, dass Lavendelduft durch die assoziierte Entspannung mehr kognitive Leistung erforderte als Zitronenduft, welcher aktivierend wirke. Auch konnte gezeigt werden, dass spezifischen EEG-Muster einen Hinweis geben, ob ein Geruch als angenehm bzw. unangenehm wahrgenommen wird (Di Flumeri et al., 2016).

Zusammenfassend lässt sich sagen olfaktorische Reize beeinflussen die messbare EEG-Aktivität maßgeblich. Welche Einflussfaktoren wie wirken, ist jedoch bis heute noch nicht abschließend geklärt. Insbesondere die Auswirkungen von Kongruenz und Inkongruenz olfaktorischer Reize auf Hirnaktivität in VR-Umgebungen sind zum jetzigen Zeitpunkt noch unerforscht. Um ein besseres Verständnis dafür zu bekommen, was bei olfaktorischer Stimulation in VR-Umgebungen passiert, beschäftigt sich ein Teilaspekt dieser Arbeit mit den Auswirkungen von Kongruenz und Inkongruenz olfaktorischer Reize auf die Veränderungen der EEG-Wellenbereiche während VR-Stimulation.

2. Theoretischer Hintergrund

2.1 Der Geruchssinn

Dass Übereinstimmungen von Gerüchen mit VR die Wahrnehmung beeinflussen, fand sich bereits in vorangegangenen Studien (Rihm et al., 2014; Seo et al., 2010, 2014; Seo & Hummel, 2011).

Um besser zu verstehen, welche Effekte der Geruchssinn als der evolutionär ältesten und unmittelbarsten unserer Sinne bei der Schaffung einer immersiven Abbildung der Realität erzielt, benötigt es ein Grundverständnis für die Anatomie und Physiologie des Riechens.

Die olfaktorische Sinneswahrnehmung, welche unsere Realität formt und beeinflusst, benötigt eine komplexe neuronale Verarbeitung und beginnt bei der Bindung eines Duftmoleküls an spezifische Rezeptoren des olfaktorischen Epithels.

Das olfaktorische Epithel, welches für das Riechen als Sinneseindruck von entscheidender Wichtigkeit ist, befindet sich hauptsächlich oberhalb der mittleren Nasenmuschel. Außerdem ist es im Nasendach und am kranialen Nasenseptum vorhanden (Boeninghaus, Lenarz 2005). Das Epithel in der Regio olfactoria ist mehrreihig. Es besteht aus 10 bis 30 Mio. olfaktorischer Rezeptorneurone (ORN), Stützzellen, Drüsen und Basalzellen. Die Basalzellen sind insbesondere nach einer Schädigung für die lebenslange Regeneration der ORN zuständig (Huppelsberg & Walter, 2005; Lüllmann-Rauch, 2003). Die ORN sind bipolar aufgebaut. Apikal befinden sich die Dendriten mit den Zilien, welche als Träger der Rezeptormoleküle dienen. Wenn Geruchsmoleküle an die Rezeptormoleküle binden, wird eine Signaltransduktion über G-Protein-gekoppelte Rezeptoren eingeleitet (Freiherr & Wiesmann, 2006). Die Axone der olfaktorischen Rezeptorneurone bilden die Fila olfactoria. Sie ziehen zunächst durch die Lamina cribrosa und bündeln sich zum Nervus olfactorius. Die Fasern des Nervus olfactorius ziehen dann weiter zum Bulbus olfactorius genauer gesagt den olfaktorischen Glomeruli, welche sich im Bulbus olfactorius befinden.

Der Bulbus olfactorius gehört evolutionsbiologisch zu dem ältesten Teil des Hirns, dem Paläocortex. Dieser ist die erste neuronale Schaltstelle des zentralen Nervensystems (Freiherr et al., 2014). Er ist in der Lage, ein Leben lang neue Interneurone zu bilden (Curtis et al., 2007) und wird aufgrund seiner Prozessierungsfunktion auch olfaktorischer Thalamus genannt (Doty, 2012).

Die olfaktorischen Glomeruli bilden eine durch Gliazellen umhüllte funktionelle Einheit, in dem die Axone der Riechzelle über glutamaterge exzitatorische Synapsen mit Dendriten der Mitralzellen und Büschelzellen verbunden werden. In ihnen werden etwa 1000 Axone eines selektiven gleichen Duftrezeptortyps einer Riechzelle auf eine Mitralzelle konvergiert (Hummel

et al., 2009; Müller et al., 2005). Diese Konversion der Axone führt zu einer Reduktion von Informationen. Ein weiterer Mechanismus, der in den Glomeruli stattfindet, nennt sich laterale Inhibition und dient zur Kontrastverstärkung und Differenzierung. Periglomeruläre Zellen wirken über dopaminerge und gabaerge inhibitorische Synapsen auf benachbarte Mitral- und Büschelzellen (Witt & Hansen, 2009). Ebenfalls hemmend wirken die gabaergen Körnerzellen, durch welche die angrenzenden Mitral- und Büschelzellen zusätzlich inhibiert werden können (Maresh et al., 2008; Marin et al., 2018). Durch die Axone des Bulbus olfactorius, genauer der Mitralzellen, werden die Signale zunächst über den Tractus olfactorius weitergeleitet, der sich in die Striae olfactoriae lateralis und medialis aufteilt. Die Striae olfactoriae lateralis bilden hier den Hauptweg der weiteren olfaktorischen Prozessierung und leiten die sensorischen Signale weiter in den sekundären olfaktorischen Cortex.

Sekundär olfaktorische Strukturen

Zu den sekundär olfaktorischen Strukturen gehören der Nucleus olfactorius anterior, die mediale Amygdala, das ventrale Striatum, ein Teil des entorhinalen Cortex und für die Prozessierung am entscheidendsten, der piriforme Cortex, da er die meisten Efferenzen des Bulbus olfactorius empfängt (siehe Abbildung 1).

Der Nucleus olfactorius anterior liegt zwischen den Fasern des Tractus olfactorius und wirkt als inhibitorische Rückkopplung zum Bulbus olfactorius. Der Nucleus Accumbens, der zum ventralen Striatum gehört, beeinflusst sowohl das dopaminerge Belohnungszentrum (Hummel et al., 2009) als auch das Sexualverhalten (Freiherr et al., 2014).

Der entorhinale Cortex ist sowohl afferent als auch efferent mit dem Bulbus olfactorius und dem piriformen Cortex verbunden, am engsten ist jedoch seine Verbindung zum Hippocampus (Chapuis et al., 2013).

Man weiß, dass entorhinaler Cortex und Amygdala das olfaktorische Gedächtnis beeinflussen (Freiherr et al., 2014).

Interessant in diesem Zusammenhang ist, dass die Amygdala von den olfaktorischen Rezeptorneuronen durch lediglich zwei Synapsen getrennt ist (Herz & Engen, 1996). Die Amygdala ist Teil des limbischen Systems und beteiligt am Erleben von Emotionen (Cahill et al., 1995). Dementsprechend konnte gezeigt werden, dass durch Geruch ausgelöste Erinnerungen emotional stärker vernetzt sind als zum Beispiel durch Worte oder Bilder ausgelöste Erinnerungen. Außerdem können die so ausgelösten Erinnerungen eine höhere Emotionalität auslösen (Herz & Cupchik, 1995; Herz & Engen, 1996; Herz et al., 2004). Zusätzlich fanden sich Hinweise, dass die Hedonik eines Geruchs, also ob ein Duft angenehm oder unangenehm riecht, entscheidend dafür ist, welche Bereiche der Amygdala aktiviert werden.

Positiv wahrgenommene Gerüche rufen eher eine linksseitige oder bilaterale Amygdala-Aktivierung hervor, wohingegen negativ konnotierte Gerüche eher die rechte Amygdala aktivieren (Patin & Pause, 2015).

Die Funktion des entorhinalen Cortex ist noch nicht abschließend geklärt. Er scheint Einfluss auf das Erkennen und semantische Benennen von Gerüchen zu haben (Kjelvik et al., 2012) sowie auf die Wahrnehmung der Intensität (Rolls et al., 2003).

Als maßgeblicher Projektionsort des Bulbus olfactorius dient jedoch der piriforme Cortex. Mittlerweile weiß man, dass er einer anatomischen und physiologischen Zweiteilung unterliegt. Der frontale Anteil ist für das richtige Erkennen eines Geruchs trotz Unterschieden in der Geruchsqualität zuständig, während der posteriore Anteil eine subjektive Bewertung vornimmt. Es finden dort also diverse Prozessierungen statt, wie zum Beispiel die Bewertung der Hedonik. Zudem hat der piriforme Cortex zahlreiche Verbindungen zu tertiären olfaktorischen Strukturen.

Tertiär olfaktorische Strukturen

Zu den tertiären olfaktorischen Strukturen gehören Inselcortex, Cortex orbitofrontalis, das ventrale Striatum, Nuclei septales, Hippocampus und Anteile des Hypothalamus (siehe Abbildung 1).

Die tertiären olfaktorischen Strukturen nehmen Einfluss auf Kognition, Gedächtnis, Wahrnehmung, Emotion und Verhalten.

Im Inselcortex sowie im orbitofrontalen Cortex werden verschiedene chemosensorische Informationen integriert und verarbeitet (Freiherr et al., 2014; Lundström et al., 2010). Der orbitofrontale Cortex hat Auswirkungen auf die kognitiven Prozesse bei der Wahrnehmung olfaktorischer Reize. So ist er zum Beispiel an der Verknüpfung von olfaktorischen und visuellen Reizen involviert (Gottfried & Dolan, 2003; Rolls et al., 2003).

Der Hippocampus erhält wie bereits erwähnt, seine Hauptafferenzen vom entorhinalen Cortex. Er hat multiple Aufgaben und Funktionen. So ist er an der Transformation vom Kurzzeit- ins Langzeitgedächtnis beteiligt, selektiert und filtert Informationen, wirkt an deklarativen Gedächtnisfunktionen mit und sorgt dafür, dass Informationen abgerufen werden können (Ergorul & Eichenbaum, 2004; Schwerdtfeger et al., 1990; Staubli et al., 1986).

Außerdem ist der Hippocampus Teil des limbischen Systems und hat eine große Bedeutung für das Gedächtnis und das Lernen.

Das limbische System ist ein funktioneller Abschnitt des Hirns, welches sich aus anatomisch nicht zusammenliegenden Hirnbereichen und Strukturen zusammensetzt. Es ist neben

vegetativen Funktionen unter anderem für assoziatives Lernen und Emotionen zuständig ist (Canli et al., 2000).

Herz & Engen (1996) beschrieben, dass zwischen olfaktorischen Rezeptorneuronen und Hippocampus nur drei Synapsen liegen. Anatomisch begründet ist dies dadurch, dass die Riechbahn als einzige sensorische Bahn die erneute Verschaltung im Thalamus umgeht (Herz & Engen, 1996; Sullivan et al., 2015). Der Thalamus wird umgangssprachlich auch das „Tor zum Bewusstsein“ genannt. Dieser Name trägt seiner Filterfunktion Rechnung, da alle anderen sensorischen Bahnen dort erneut verschaltet werden, bevor sie ins Großhirn ziehen (Sabri et al., 2005). Anzunehmen ist, dass die Umgehung des Thalamus darauf hindeutet, wie wichtig olfaktorische Reize bei der Wahrnehmung von Gefahren sind.

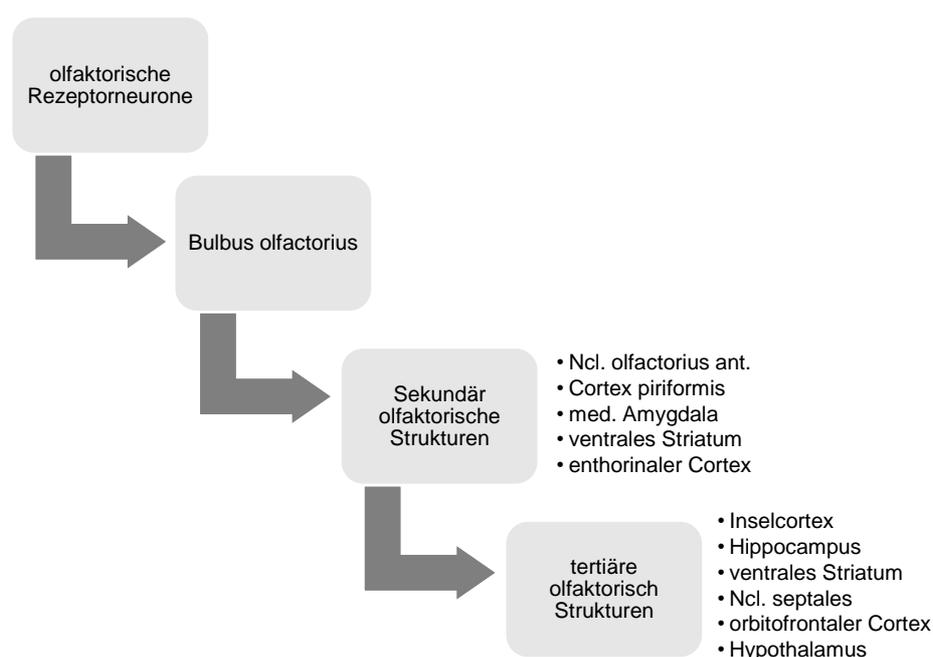
Die direkte Verbindung der Geruchsbahn zum limbischen System erklärt daher, warum Geruch, Gedächtnisbildung, Affekt und Verhalten so eng verknüpft sind.

Gleichzeitig wird durch den einzigartigen Aufbau der Riechbahn mit den vielfältigen und komplexen neuronalen Verbindungen verständlich, warum olfaktorische Stimulation die Möglichkeit bietet, die Gedächtnisleistung durch eine höhere Vernetzung zu verbessern (Chen, 2006).

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass obwohl die genaue Verarbeitung olfaktorischer Reize mit all den Einflussfaktoren noch nicht endgültig verstanden ist, man jedoch erahnen kann, wie komplex und vielseitig die Beeinflussbarkeit unserer Wahrnehmung durch die multiplen Beziehungen sind.

Abbildung 1:

Eigene Darstellung der zentralen Verarbeitung olfaktorischer Sinneseindrücke



2.2 EEG

Das EEG ist eine psychophysiologische Messmethode, welche Hirnaktivität quantifizierbar machen kann (Tauscher et al., 2019). Es bietet die Möglichkeit, kognitive Prozesse während olfaktorischer Stimulation abzubilden (Tauscher et al., 2019). Um ein besseres Verständnis für das EEG als Messmethode zu erlangen, sind im Folgenden die Grundlagen dieser Untersuchungsmethode beschrieben.

2.2.1 Elektroenzephalografie:

Die Elektroenzephalografie geht zurück auf Berger, der die ersten Untersuchungen 1924 durchführte und ab 1929 dazu veröffentlichte (Berger, 1929).

Das EEG ist ein nicht invasives und routinemäßig angewendetes Verfahren zur Erfassung von Hirnaktivität. Hierfür werden elektrische Potentiale von Neuronen über Oberflächenelektroden mithilfe eines Differenzverstärkers abgeleitet. Die Potentialschwankungen im Spontan-EEG zeichnen sich durch bestimmte Amplituden (10-100 μV) bzw. Frequenzen (0,5 bis 100 Hz) aus (Mattle et al., 2015). Die Potentialschwankungen entstehen hierbei durch inhibitorische und exzitatorische Potentiale, welche sich durch die Aktivierung multipler paralleler Pyramidenzellen ausbilden (Witte et al., 2006). Hierbei werden kleinste Veränderungen detektiert, (in $\mu\text{V} = 10^{-6}\text{V}$), weshalb es einen leistungsstarken Verstärker benötigt, der das Signal um den Faktor 10^4 – 10^6 verstärken kann (Fahr & Hofer, 2013).

Abgeleitet wird das EEG nach dem internationalen 10/20 System, welches Jasper 1958 etablierte. Hierfür wird der Schädel aller Proband*innen vom Nasion zum Inion vermessen und die EEG-Elektroden auf der dazwischenliegenden Strecke in 10 %- bzw. 20 %-Abständen positioniert. Auch präaurikulär werden die EEG-Elektroden in den jeweiligen prozentualen Abständen angebracht. In Verbindung mit einem Kopf-getragenen Display kann die korrekte Ableitung der Elektroden des EEGs eine Herausforderung darstellen. Da zunächst das EEG angelegt wird, muss die VR-Brille über der Kappe mit den Elektroden getragen werden. Die VR-Brille hat zur Befestigung flexible Bänder, die auf die Elektroden drücken und Reibung erzeugen können. Dies wiederum kann die Datenqualität erheblich beeinträchtigen (Tauscher et al., 2019). Insbesondere wenn Proband*innen mit angelegtem EEG und VR-Brille zusätzlich noch Bewegungen ausführen sollen, wie zum Beispiel Kopfdrehungen, kann es zu Artefakten kommen (Tauscher et al., 2019). Allerdings ist das EEG bzw. die generierten Daten im Vergleich zu anderen bildgebenden Verfahren wie PET oder fMRT stabil, was Bewegungsartefakte angeht (Davidson, 2007).

2.2.2 Frequenzbereiche im EEG

Das entscheidende Merkmal im EEG ist die Frequenz (Zschoke & Hansen, 2012). Die Frequenzschwankungen oder auch Oszillationen werden in Hertz angegeben und schwanken zwischen 0,5 und 100 Hertz. Ein Hertz entspricht hierbei einer Schwingung pro Sekunde.

Die Wellenformen und Frequenzbereiche des EEGs verweisen auf unterschiedliche Bewusstseinszustände sowie auf pathologische Veränderungen.

Berger (1929) setzte sich vor allem mit Alpha- und Beta-Wellen auseinander. Alle langsameren Wellen wurden bis dato unter der Kategorie Delta-Wellen zusammengefasst. Erst später wurden diese dann erneut in Delta- und Theta-Wellen unterteilt (Walter & Dovey, 1944).

Delta-Wellen

Delta-Wellen entsprechen Frequenzen von kleiner oder gleich 4 Hertz. Sie treten vor allem im Tiefschlaf oder bei pathologischen Veränderungen auf. Sie besitzen die größte Amplitude und werden abgelöst durch die höherfrequent schwingenden Theta-Wellen.

Theta-Wellen

Theta-Wellen haben eine Frequenz von 4-7 Hertz und treten bei Erwachsenen vor allem in den ersten zwei Schlafphasen sowie beim Übergang von der Wach- zur Schlafphase auf. Im Gegensatz zu Erwachsenen kommen Theta-Wellen bei Kindern auch während der Grundaktivität des Cortex vor.

Alpha-Wellen

Zwischen 8-13 Hertz schwingen die Alpha-Wellen und bilden damit die kortikale Grundaktivität ab (Zschoke & Hansen, 2012). Lange Zeit ging man davon aus, dass Alpha-Wellen als Zeichen entspannter Wachheit zu deuten waren. Heute weiß man jedoch, dass Alpha-Wellen ebenso bei Gedächtnisbildung, Aufmerksamkeit, Hemmung und Wahrnehmung auftreten (Ebner et al., 2011). Alpha-Wellen sind nur bei vorhandener Vigilanz und geschlossenen Augen zu detektieren. Sobald die Augen geöffnet werden und visuelle Reize zur Verarbeitung hinzukommen, tritt der sogenannte Berger-Effekt auf: Hierbei werden Alpha-Wellen durch Beta-Wellen abgelöst.

Beta-Wellen

Beta-Wellen sind kleine kurze Wellen, welche in unregelmäßigen Abständen bei einer Frequenz von 13-30 Hertz auftreten. Sie kommen insbesondere bei Konzentration und Aufmerksamkeit vor, (Berger, 1929) können aber auch bei Aufregung oder Angst zu finden sein. Beta-Wellen werden abgelöst durch Gamma-Wellen,

Gamma-Wellen

Gamma-Wellen schwingen mit einer Frequenz von mehr als 30 Hertz. Sie sind bei starker Konzentration oder beim Erlernen neuer Inhalte zu finden.

3. Motivation der Arbeit

Vor dem vorgestellten theoretischen Hintergrund ergibt sich weiterer Untersuchungsbedarf im Hinblick auf die Beeinflussung der Wahrnehmung in VR-Umgebungen.

In vorangegangenen Studien konnte bereits gezeigt werden, dass angenehme Erinnerungen eher emotional vertieft wurden (Cabanac, 2002), wobei die Kongruenz als entscheidender Faktor für eine angenehme Bewertung gilt (Seo et al., 2014).

In der hier vorliegenden Studie soll dieser Effekt überprüft werden, hierfür wurde untersucht, wie sich Kongruenz und Inkongruenz auf die Wahrnehmung in VR-Umgebungen auswirken.

Obwohl VR-Umgebungen in Bezug auf Wissenserwerb und Gedächtnisleistung ein vielversprechendes Werkzeug zu sein scheinen, sind die Auswirkungen der Gedächtnisleistung auf die Wahrnehmung von VR-Umgebungen bis heute unerforscht.

In dieser Studie soll nun überprüft werden, ob die Gedächtnisleistung Einfluss auf die Wahrnehmung in VR-Umgebungen hat.

Das olfaktorische Stimuli die EEG-Frequenz verändern, konnte bereits 1962 festgestellt werden (Moncreiff, 1962). Seitdem hat sich auf dem Gebiet der elektrophysiologischen Messmethoden viel getan. Mit dem zunehmenden Einsatz von VR-Umgebungen zu Lernzwecken stieg das Interesse, ob die Gehirnaktivität durch unterschiedliche Stimuli verbessert werden kann. Um besser zu verstehen, welchen Einfluss Kongruenz und Inkongruenz von olfaktorischen Reizen hat, wurde zusätzlich überprüft, ob olfaktorische Stimulation in VR-Umgebungen spezifische EEG-Veränderungen hervorruft.

.

Zusammenfassend lassen sich drei Forschungshypothesen formulieren:

1. Proband*innen, welche die VR-Umgebungen subjektiv und objektiv als kongruenter wahrnehmen, erinnern sich später positiver an die Umgebung.
2. Teilnehmende mit einem subjektiv erklärten und objektiv gemessenen besseren Gedächtnisleistung bewerten die VR-Umgebung positiver als Teilnehmende mit niedrigerer Gedächtnisleistung.
3. Kongruenz von olfaktorischen Reizen in VR-Umgebungen führt zu einer Zunahme bzw. Rechtsverschiebung der Leistungsdichtespektren in niedrigen EEG-Wellenbereichen (Delta, Theta, Alpha) wohingegen bei Inkongruenz eher eine Abnahme bzw. Linksverschiebung der Leistungsdichte postuliert wird.

4. Material und Methoden

4.1 Proband*innen und Teilnahme Kriterien

Die Studie wurde gemäß der Deklaration von Helsinki über biomedizinische Forschung am Menschen geplant und durchgeführt. Der entsprechende Antrag zur Durchführung dieser Studie wurde der Ethik-Kommission an der Medizinischen Fakultät Carl Gustav Carus der Technischen Universität Dresden vorgelegt und positiv begutachtet.

An der Studie nahmen 100 freiwillige gesunde Proband*innen teil, die für die Teilnahme eine angemessene Aufwandsentschädigung erhielten.

Tabelle 1:

Ein- und Ausschlusskriterien

Einschlusskriterien	Ausschlusskriterien
Alter > 18 Jahre	Alter < 18 Jahren
Gesunde Proband*innen	Schwangerschaft
Freiwillige Teilnahme	Wesentliche gesundheitliche Beeinträchtigung (z. B. Niereninsuffizienz, M. Parkinson, Tumoren des Mund- und Rachenraums)
Normale Kognition, nachgewiesen durch den MoCA-Test	Akute oder chronische Entzündungen der Nase oder Nasennebenhöhlen
Normaler Affekt, nachgewiesen durch die PANAS-Skala	
Normale Riechfunktion nachgewiesen durch einen 3-Item-Geruchsidentifikationstest mithilfe der Sniffin' Sticks	

4.2 Studiendesign

Abbildung 2:

Ablauf des Versuchs

MoCA = Montreal Cognitive Assessment, PANAS = Positive and Negative Affect Schedule



Alle Teilnehmenden wurden zunächst mündlich über den Ablauf der Studie aufgeklärt. Anschließend unterschrieben sie eine schriftliche Einwilligungserklärung. Alle Proband*innen wurden über die Möglichkeit informiert, die Teilnahme an der Studie jederzeit zu beenden und die Nutzung der Daten widerrufen zu können. Die Rekrutierung erfolgte über Aushänge und aus dem Bekanntenkreis. Die Datenerhebung fand in der Zeit vom 01.11.2020 bis 01.05.2021 im interdisziplinären Zentrum für Riechen und Schmecken der Uniklinik Dresden statt. Für die Untersuchung wurde ein Zeitraum von 2 Stunden angesetzt, einschließlich der separaten erneuten telefonischen Befragung.

Um die Eignung der Proband*innen für die Studie festzustellen wurden im Vorfeld affektive, kognitive und psychophysikalische Tests durchgeführt (siehe Abbildung 2).

Alle Teilnehmenden wurden dem PANAS-Test, dem MoCA-Test und abschließend einer Riechtestung mit Sniffin' Sticks unterzogen. Im Anschluss wurde den Teilnehmenden ein 64-Kanal-EEG angelegt und mithilfe einer VR-Brille fünf Filme gezeigt. Nach jedem Film mussten Fragen zu den einzelnen Filmsequenzen beantwortet werden. Zwei Wochen nach dem Experiment wurden die Teilnehmenden telefonisch erneut zu den Filmen befragt, was bereits bei der Aufklärung angekündigt wurde.

4.3 Experimenteller Aufbau

4.3.1 Ablauf und Durchführung

Bei der ersten Sitzung bekamen alle Proband*innen zunächst das EEG angelegt (siehe Abbildung 5). Daraufhin wurde ihnen eine VR-Brille (Sony, Minato, Tokio, Japan) aufgesetzt, in die ein Smartphone eingelegt werden konnte. Im folgenden Experiment wurden auf dem Smartphone (Apple iPhone, Cupertino, Kalifornien, Vereinigte Staaten) fünf 360-Grad-Filme mittels Youtube.com (Google LLC 2021, San Bruno, Kalifornien, USA) für exakt drei Minuten gezeigt.

Um die erste Hypothese untersuchen zu können, benötigt es Filme, welche olfaktorische Assoziationen hervorrufen (siehe Abbildung 3). Nur so können die Auswirkungen von Kongruenz und Inkongruenz durch gleichzeitige olfaktorische Stimulation im Hinblick auf die Wahrnehmung der VR-Umgebung überprüft werden. Es wurden für jede Bedingung, angenehm und unangenehm, zwei Filme zur Darbietung ausgewählt, was die Gültigkeit der Daten erhöhte.

Zur Kontrolle wurde ein Video, welches keine olfaktorischen Assoziationen hervorruft, gewählt.

1. Tulpenfeld, 2. Verlorene Orte, 3. Kaffeehaus, 4. Küstenexpedition, 5. Visualisierung von der Sternennacht von Van Gogh.

Abbildung 3:

*Videos, die den Proband*innen vorgespielt wurden*



Die Küstenexpedition



Verlorene Orte



Das Tulpenfeld



Das Kaffeehaus



Die Sternennacht

Angenehm:

Als ansprechende Filme wurden das Tulpenfeld und das Kaffeehaus ausgesucht (siehe Abbildung 4).

Im Tulpenfeld-Video spazieren die Teilnehmenden virtuell durch einen Park mit verschiedenfarbigen Tulpen. Im Video sind ebenfalls andere Blumen zu sehen und auch anderen Besucher*innen. Die Stimmung des Videos ist entspannt und ruhig.

Im Kaffeehaus Video bereitet ein Barista Kaffee zu und unterhält sich währenddessen mit Kund*innen. Die Proband*innen sollen hier die belebte, angenehme Stimmung wahrnehmen, da um sie herum viel sozialer Interaktion passiert.

Unangenehm:

Als allgemein unangenehme Videos wurden verlorene Orte und die Küstenexpedition ausgesucht (siehe Abbildung 4).

Das verlorene-Orte-Video nimmt die Zuschauenden mit an heutzutage verlassene, verkommene Orte und soll die Zuschauenden in eine beklemmende und unheimliche Realität versetzen.

Bei dem Video der Küstenexpedition hingegen bereisen die Teilnehmer*innen virtuell die mit Plastikmüll übersäte schottische Küste. Zu sehen ist, wie sich der Müll in die natürliche Umgebung einfügt. Die Stimmung soll trotz der Naturbilder beklemmend sein und die Zuschauenden unweigerlich mit Umweltverschmutzung konfrontieren.

Neutral:

Als neutrales Video diente die Sternennacht (siehe Abbildung 4).

Während des Videos werden die Zuschauenden mit in das Van Gogh Gemälde „Sternennacht“ genommen. Die Bilder sind animiert und man schwebt zunächst in das Gemälde. Von dort gleitet man weiter in eins der Gebäude, in dem man dann das Interieur betrachten kann.

Zu Beginn der Filme bekamen alle Proband*innen Nasenclips, welche sie sich dann zu Beginn der Filme selbstständig in die Nase einsetzen sollten. Die Nasenclips wurden bereitgestellt von Aspura Clip GmbH, Berlin-Schönefeld, Deutschland.

Die Silikonclips beinhalten einen Speicher, der mit unterschiedlichen Aromen befüllt werden kann. Je nach benötigten Düften wurden die Nasenclips vorher mit den unterschiedlichen Aromen befüllt bzw. nicht befüllt für die Verwendung als Placebo-Clip.

Die ausgesuchten Aromen sollten in erster Linie eine deutliche Kongruenz bzw. Inkongruenz zu den ausgewählten Videos schaffen. Es wurden den Videos entsprechend jeweils zwei angenehme und zwei unangenehme Gerüche ausgewählt. Um eine Beeinflussung durch das reine Wiedererkennen zu vermeiden, wurden zwei bekannte und zwei unbekannte Düfte gewählt (siehe Abbildung 4). Zusätzlich gab es einen Placebo Duft, welcher nach nichts roch. Dieser stellt die olfaktorische Entsprechung des Van Gogh Videos da, welches mit keinem Geruch assoziiert ist.

Die Grundlage der ausgesuchten Düfte bildete eine Pilotstudie mit einer kleinen Gruppe von Geruchsexperten. Diese kategorisierten die Gerüche grob in angenehm bekannt (Schokolade), angenehm unbekannt (Weinblattnektar), unangenehm bekannt (Fischöl) und unangenehm unbekannt (Butanol).

Alle Teilnehmenden wurden darüber aufgeklärt, dass nicht jeder Nasenclip einen Duft enthält.

Abbildung 4:

Auswahl der jeweiligen Duftstoffe

Angenehm Bekannt	Angenehm Unbekannt	Unangenehm bekannt	Unangenehm unbekannt	Placebo
•Schokolade	•Weinblattnektar	•Fischsauce	•Butanol	•Kein Geruch

Angenehm:

- bekannt

Schokolade wurde als angenehmer, bekannter Geruch gewählt. Es wurde unter kongruenten Bedingungen zu dem Kaffeehaus-Video präsentiert. Hergestellt wird der Duft „Chocolat Noir“ mit der Produktnummer: JSEDIB017CK von Takasago Europe GmbH, Zülpich, Deutschland.

- unbekannt

Hier wurde der blumig duftende Weinblattnektar ausgewählt. Er wurde unter kongruenten Bedingungen zu dem Tulpenfeld-Video präsentiert. Hergestellt ist er von Fragrance Resources GmbH, Deutschland unter dem Namen Nectarome Wine Leaf mit der Produktnummer: 84929-27-1.

Unangenehm:

- bekannt

Fischsauce wurde als unangenehmer bekannter Geruch gewählt und unter kongruenten Bedingungen zur Küstenexpedition dargeboten. Die Produktnummer ist 8016-13-5 und die Sauce wird hergestellt von Thai Fishsauce Factory, Squid Brand Co, Bangkok, Thailand.

- unbekannt

Butanol wurde in der Kategorie unangenehm unbekannt verwendet. Es riecht muffig, stechend nach ungewaschener Kleidung und wurde unter kongruenten Bedingungen zu dem verlorene Orte-Video gereicht. Hergestellt wird der Duft von Sigma Aldrich, St. Louis, Missouri, Vereinigte Staaten unter dem Namen 1-Butanol mit der Produktnummer: 71-36-3.

Neutral:

Das neutrale Sternennacht-Video wurde immer als Kontrolle mit einem geruchlosen Nasenclip, also einem Placebo, dargeboten.

Die Teilnehmenden wurden zufällig in fünf Gruppen unterteilt, wobei jede Gruppe aus 20 Proband*innen bestand. Gruppe 1 wurde zu jedem Video der passende Geruch präsentiert (kongruente Bedingung). Den anderen 4 Gruppen wurden zu jedem Video inkongruente Gerüche präsentiert. Die Ausnahme bildete das Sternennacht-Video, bei dem in allen Gruppen ein neutraler Geruch (Placebo) verwendet wurde (siehe Tabelle 2).

Tabelle 2:

Einteilung der Gruppen mit entsprechend präsentierten Gerüchen

Dreidimensionale 360° Videos					
Gruppennummer	Tulpenfeld	verlorene Orte	Kaffeehaus	Küsten Expedition	Sternennacht
Gruppe 1	Weinblattnektar	Butanol	Schokolade	Fischsauce	Placebo
Gruppe 2	Butanol	Schokolade	Fischsauce	Placebo	Placebo
Gruppe 3	Schokolade	Fischsauce	Placebo	Weinblattnektar	Placebo
Gruppe 4	Fischsauce	Placebo	Weinblattnektar	Butanol	Placebo
Gruppe 5	Placebo	Weinblattnektar	Butanol	Schokolade	Placebo

Abbildung 5:

Probandin mit angebrachten 64-Kanal-EEG, VR-Brille sowie Kopfhörer auf dem Versuchsstuhl



Während der Filme wurde mithilfe eines MP3-Players und über Kopfhörer „Weißes Rauschen“ abgespielt (siehe Abbildung 5). „Weißes Rauschen“ ist ein frequenzunabhängiges Rauschen, das alle Frequenzbereiche gleichermaßen abdeckt. Ziel war es, eine akustische Ablenkung zu vermeiden und so die untersuchten Effekte eindeutiger der olfaktorischen Stimulation zuordnen zu können.

Den Teilnehmenden wurden daraufhin folgende Anweisung gegeben: „Sie werden fünf Videos sehen, während Sie verschiedene Gerüche aus einem Nasenclip riechen. Ich werde Ihnen kurz sagen, worum es in dem Video geht. Sie können Ihren Kopf ständig hin- und herbewegen und versuchen, sich an den Ort des Videos zu versetzen. Bitte versuchen Sie, sich alles zu merken, was Sie können. Am Ende werden Ihnen einige Fragen zum Video gestellt.“

Nach jedem Video wurde eine Befragung mit den Teilnehmenden durchgeführt. Hierfür wurden alle zuvor gesetzten Reize, also Nasenclips, White-Noise und VR-Umgebung entfernt. Als Erstes wurde die Behaglichkeit des Films mit dem präsentierten Geruch abgefragt. Die Proband*innen sollten ihr Erlebnis hierfür auf einer verbalen Ratingskala zwischen -5 = „extrem unangenehm“ und +5 = „extrem angenehm“ einordnen. Als Zweites wurde die Intensität des VR-Erlebnisses abgefragt 0 = „gar nicht intensiv“ bis 10 = „extrem intensiv“. Als drittes Charakteristikum wurde die Vertrautheit abgefragt -5 = „extrem unvertraut“ bis +5 = „extrem vertraut“. Als viertes Kriterium sollten die Teilnehmenden beantworten, wie kongruent bzw. inkongruent Video und Geruch waren; sprich wie gut diese für sie zusammengepasst haben. Die Skalierung erfolgte hier von -5 = „extrem inkongruent“ bis +5 = „extrem kongruent“. Zudem wurde die Unterhaltsamkeit auf einer Skala von 0 = „gar nicht unterhaltsam“ bis 10 = „extrem unterhaltsam“ abgefragt.

Im Folgenden wurden den Proband*innen inhaltliche Fragen zu den jeweiligen Videos gestellt. Die Fragen bezogen sich sowohl auf allgemeine Umgebungseigenschaften als auch auf Details, wodurch die Merkfähigkeit der Teilnehmenden getestet wurde (siehe hierzu Tabelle 3). Den Teilnehmenden wurde nicht gesagt ob die Antwort korrekt oder inkorrekt waren.

Tabelle 3:

Fragen zu den einzelnen Videos

Das Tulpenfeld

- Welche Blumenfarben haben sie im Laufe des Videos gesehen?
- Waren Menschen im Video zu sehen? Wenn ja, wie viele ?
- Welche Blumenfarbe war die Erste, die sie gesehen haben?
- Waren Bäume in ihrer direkten Nähe?
- Wenn ja, wie viele?

Verlorene Orte

- Der erste Raum, in dem sie sich befunden haben, was war das für ein Raum?
- In dem Raum stand etwas an der Wand, was stand dort?
- Haben sie sonstige Wörter im Laufe des Videos lesen können?
- In welcher Jahreszeit spielt das Video?

Das Kaffeehaus

- Welche T-Shirt-Farbe hatte das T-Shirt vom Barista?
- Was waren die Zutaten des ersten Getränks, das er zubereitet hat?
- Wie hieß das Kaffeehaus?
- Mit wie vielen Kund*innen hat der Barista gesprochen?
- Hatte einer der Kund*innen ein Gesichtsassessorie?

Die Küstenexpedition

- Welche Farbe hatte die Jacke des Manns auf dem Schiff?
- Welche Farbe hatten die Seevögel?
- Wie viele Menschen waren auf dem Schiff?
- Haben die Menschen auf dem Schiff Helme getragen?
- Wenn ja, welche Farbe hatten die Helme?
- Was für Müll haben sie hauptsächlich gesehen?

Die Sternennacht

- Welche Farben hatte die Hauswand?
- Welche Farbe hatte die Tür?
- Welche Farbe hatte das Bett?
- Wie viele Bilderrahmen hingen in dem Raum?
- Und welche Farbe hatten diese?

4.3.2 Telefonat zur erneuten Befragung der Proband*innen

Zwei Wochen nach der Teilnahme an der Studie wurden alle Proband*innen, wie bereits bei der Aufklärung zur Studie besprochen, erneut befragt. Ziel der Erinnerungs-Rückruf-Sitzung war die Einschätzung langfristiger Auswirkungen von olfaktorischen Reizen in Bezug auf Wahrnehmung von VR-Umgebung und Gedächtnis.

Zunächst wurden die Proband*innen gefragt, wie sie ihr Gedächtnis auf einer Skala von -2 = „sehr schlecht“ bis + 2 = „sehr gut“ bewerten würden. Des Weiteren wurde gefragt, wie viele Medien täglich konsumiert wurden. Unter einer Stunde, eine bis drei Stunden, oder über drei Stunden. Auch wurde nach der Unterhaltsamkeit des Experiments und speziell jedes einzelnen Videos auf einer Skala von 1 = „gar nicht unterhaltsam“ bis 10 = „extrem unterhaltsam“ gefragt und ob die Proband*innen in Zukunft Videos mit oder ohne Geruch bevorzugt würden.

Überdies wurde dann für jedes Video separat abgefragt, ob sie während des Videos einen Geruch präsentiert bekommen hatten und nach was dieser ggf. gerochen hatte. Außerdem sollten sie auf einer jeweils zehnstufigen Likert-Skala beurteilen: wie intensiv 0 = „gar nicht intensiv“ bis 10 = „extrem intensiv“ und angenehm -5 = „extrem unangenehm“ bis +5 = „extrem angenehm“ sie den Geruch empfunden hatten und wie gut der Duft zur jeweiligen VR-Umgebung gepasst hatte 0 = „gar nicht kongruent“ bis 10 = „extrem kongruent“.

Auch alle inhaltlichen Fragen zu den einzelnen Videos wurden erneut gestellt (siehe Tabelle 3).

Zusätzlich wurde bei der erneuten telefonischen Befragung ermittelt, ob die Teilnehmenden das Video erneut schauen wollen würden und wie lange sie annahmen, dass die einzelnen Videos gedauert hatten.

Alle Proband*innen wurden befragt, ohne dass explizit auf Kongruenz oder Inkongruenz der Gerüche und der VR hingewiesen wurde, um eine mögliche Verfälschung der Ergebnisse zu verhindern.

4.4 Methoden

Positive and Negative Affect Schedule / PANAS-Skala

Die PANAS-Skala ist ein valides und zuverlässiges Maß, um aktuelle und länger anhaltende Affekte zu bestimmen. Die PANAS-Skala zeigt eine Stabilität der Ergebnisse von bis zu 2 Monaten (Watson et al., 1988). Für das Experiment sollten die Teilnehmenden ihre Stimmung der vergangenen zwei Wochen einschätzen. Beim PANAS-Test werden hierfür jeweils 10 positive und negative Affekte beurteilt. Die Antwortskala beinhaltet fünf Kategorien, in denen die Teilnehmenden einschätzen sollen, wie oft sie die vorgegebene Stimmung bzw. den Affekt in den letzten zwei Wochen gefühlt bzw. erlebt haben: 1 = gar nicht; 2 = ein bisschen; 3 = einigermaßen; 4 = erheblich; 5 = äußerst.

Die Punktzahlen für die positiven wie auch die negativen Affekte werden addiert und liegen zwischen 10 und 50 Punkte, wobei höhere Punktzahlen mit einem höheren Maß an positiven oder negativen Affekten einhergehen. Für die Studie wurden nur Teilnehmende eingeschlossen, welche in den für die deutsche Bevölkerung angegebenen Normen lagen. Alle Proband*innen konnten nach den Normen von Krohne et al., (1996) eingeschlossen werden.

Montreal Cognitive Assessment / MoCA-Test

Um die Kognition zu beurteilen, wurde der Montreal Cognitive Assessment Test (MoCA) durchgeführt. Der MoCA-Test ist eine schnell durchzuführende Prüfung, um leichte kognitive Einbußen zu erfassen. Er stellt ein validiertes Screening-Instrument mit hoher Sensitivität und Spezifität dar (Nasreddine et al., 2005). Der Test deckt die Bereiche Konzentration und Aufmerksamkeit, visuo-konstruktives Denken, konzeptuelles Denken, Orientierung, Rechnen, Sprache und Gedächtnis sowie Exekutivfunktionen ab (Bühler, 2013).

Für den Einschluss in die Studie mussten die Teilnehmenden mindestens 26 Punkte aufweisen. Ein normales Funktionsniveau entspricht 26 bis 30 Punkten. Laut den Normwerten wurde eine Person der vorliegenden Stichprobe mit einer leichten kognitiven Beeinträchtigung bei einem Wert von 25 von den weiteren Analysen ausgeschlossen.

Sniffin' Sticks

Für die Testung der Riechfunktion wurde ein 3-Item-Geruchsidentifikationstest mithilfe der Sniffin' Sticks (Burghart Messtechnik, Holm, Deutschland, 1995) durchgeführt, um die normale olfaktorische Wahrnehmung der Teilnehmer*innen zu ermitteln (Sorokowska et al., 2019) (siehe Abbildung 6). Hierfür wurde den Proband*innen jeweils ein Sniffin' Stick präsentiert, der anhand einer Bildertafel einem von vier zur Auswahl stehenden Gerüchen zugeordnet werden

sollte. Die zu erkennenden Gerüche waren Zimt, Banane und Fisch und mussten jeweils von drei Distraktoren abgegrenzt werden (siehe Tabelle 4).

Vorgegangen wurde nach einem Multiple-Forced-Choice-Prinzip, da das richtige Benennen von Gerüchen für viele Menschen eine Herausforderung darstellt (Hummel et al., 2007). Es wurden nur normosmotische Proband*innen eingeschlossen, welche mindesten 2 von 3 Gerüchen richtig erkannten. Alle Teilnehmenden konnten eingeschlossen werden.

Tabelle 4:

Drei-Komponenten-Identifikationstest Sniffin' Stick inclusive der Distraktoren

3.	Honig	Vanille	Zimt	Schokolade
5.	Kokos	Kirsche	Walnuss	Banane
16.	Fisch	Brot	Käse	Schinken

Abbildung 6:

Sniffin' Sticks Identifikationstest.

Die Teilnehmenden riechen an dem Stick und sollen daraufhin das kongruente Bild auf dem Kartenset erkennen



EEG

Alle eingeschlossenen Proband*innen bekamen ein 64-Kanal-EEG angelegt, bestehend aus Ag-AgCl-Stiftelektroden und 8 Ag-AgCl-Flachelektroden, beide hergestellt von Biosemi, Niederlande.

Das EEG wurde als psychophysiologische Untersuchungsmethode gewählt, da es trotz der Kopfbewegungen der Teilnehmenden im Vergleich zu anderen Messmethoden wie PET oder fMRT, relativ artefaktarme Daten generiert (Davidson, 2007). Zusätzlich ist das EEG ein guter Kompromiss zwischen Kosten, Tragbarkeit, Benutzerfreundlichkeit und Leistung in Bezug auf die räumliche und zeitliche Auflösung (Aricò et al., 2018; Mancini et al., 2021).

Pro Video wurde das EEG für jeweils 3 Minuten mit Hilfe des Programms ActiView, ebenfalls von Biosemi, Niederlande, aufgezeichnet. Als Ableitpositionen wurden F3, F4, FZ, F7 und F8 genutzt, da bekannt ist, dass von diesen Kanälen aufgezeichnete elektrische Aktivität elektrophysiologisch mit VR, Wahrnehmung und olfaktorischer Stimulation korreliert.

F3, F4 und FZ leiten die frontale Hirnaktivität ab, während F7 und F8 die anteriore fronto-temporale Hirnaktivität ableiten.

Für die Abtastfrequenz der zeitlich kontinuierlichen EEG-Daten wurde 512 Hz gewählt und als Filter wurde ein 0,5 – 48 Hz Bandpassfilter verwendet.

Um einzelne Frequenzen in der zeitlichen Dynamik eines EEGs zu quantifizieren, wurde eine Zeit-Frequenz-Analyse mit Hilfe von MATLAB (The MathWorks, Natick, Massachusetts, Vereinigte Staaten, 1984) erstellt. Hierfür werden einzelne Frequenzen herausgefiltert, zerlegt und analysiert.

4.5 Datenanalyse der Fragebögen

Für die Analysen wurden die Items der ersten und der Erinnerungs-Rückruf-Sitzung kombiniert. Es wurden vier Bedingungen konstruiert, um Prädiktoren für die Wahrnehmung der 5 VR-Umgebung zu spezifizieren:

1. die objektive Einteilung in kongruente vs. inkongruente VR-Bedingung;
2. die subjektiv wahrgenommene Einteilung in kongruente vs. inkongruente VR-Bedingung;
3. das objektiv korrekte Erkennen vs. inkorrekte Erkennen einzelner Details der VR-Präsentation;
4. das hohe subjektive Gedächtnisniveau vs. das niedrige subjektive Gedächtnisniveau der VR-Präsentation.

Im Folgenden ist beschrieben, wie die einzelnen Bedingungen konstruiert wurden.

1. Objektive Kongruenz

Die erste Bedingung wurde durch die objektive Aufteilung in kongruente vs. inkongruente VR-Bedingung hergestellt. Zur Erinnerung nur die erste Gruppe, bestehend aus 20 Proband*innen erhielt die kongruente Duftsituation (siehe hierzu Tabelle 2). Für das Tulpenfeld wurde der Duft Weinblattnektar als kongruente Duft-Situation ausgewählt, während für die verlorenen Orte Butanol gewählt wurde. Für das Kaffeehaus diente Schokolade als kongruente Geruchsbedingung und für die Küstenexpedition wurde Fischsauce gewählt. Für das Video Sternennacht von van Gogh wurde der Placebo-Clip genutzt.

2. Subjektive Kongruenz

Die zweite Bedingung wurde konstruiert, indem die Teilnehmenden nach dem Mittelwert der deklarierten Wahrnehmung der Kongruenz der einzelnen VR-Präsentation (Item: „Wie inkongruent oder kongruent war die VR auf einer Ratingskala von -5 bis +5“) in zwei Gruppen aufgeteilt wurden. Auf diese Weise wurde eine Gruppe aus Proband*innen gebildet, die die individuelle VR-Präsentation subjektiv als kongruent wahrnahmen und die andere Gruppe bestand aus Proband*innen, die die individuelle VR-Präsentation subjektiv als inkongruent wahrnahmen.

3. Objektive Gedächtnisleistung

Die dritte Bedingung wurde konstruiert, indem die Teilnehmenden in eine Gruppe mit korrekter Erkennung einzelner Videodetails (objektiv hohes Gedächtnisniveau) und die andere Gruppe mit falscher Erkennung (objektiv niedriges Gedächtnisniveau) aufgeteilt wurden. Zur Bildung des individuell ausgeprägten Gedächtnisniveaus wurde jeweils ein Item pro Video ausgewählt, um eine verbesserte Auswertbarkeit zu erzielen. Diese Auswahl kann Tabelle 5 entnommen werden.

Tabelle 5:

Ausgewählte Fragen zur Auswertung des Erinnerungsvermögens

VR-Präsentation	Item
Tulpenfeld	Welche Blumenfarben wurden gesehen?
verlorene Orte	Was für ein Raum war die erste indoor Location?
Kaffeehaus	Welche Farbe hatte das T-Shirt vom Barista ?
Küstenexpedition	Welche Farbe hatte die Jacke des Arbeiters?
Sternennacht	Welche Farbe hatte das Haus von außen ?
Alle Items wurden auf eine Skala von 1 = „richtig“ bis 0 = „nicht erinnert“ eingeteilt	

4. Subjektive Gedächtnisleistung.

Die vierte Bedingung wurde gebildet, indem die Teilnehmenden nach dem Mittelwert der subjektiven Erinnerung in jeder VR-Präsentation (Item: „Wie würden Sie Ihre Erinnerung an das Video bewerten auf einer Skala von 1 bis 10?“) in zwei Gruppen aufgeteilt wurden. Auf diese Weise bestand hier eine Gruppe aus Proband*innen, die ein hohes subjektives Erinnerungsniveau angaben, und die andere Gruppe bestand aus Teilnehmer*innen, die ein niedriges subjektives Erinnerungsniveau angaben.

Alle Bedingungen, außer der ersten, wurden für jede der 5 VR-Präsentationen separat gebildet. Für die Datenanalyse wurde eine Kovarianzanalyse mit zwei objektiven Maßen 1. objektiv kongruente vs. inkongruente VR-Bedingung; 2. objektiv hohes vs. niedriges Gedächtnisniveau der einzelnen Videodetails als fixe Faktoren und zwei subjektiven Maßen 3. subjektiv wahrgenommene kongruente vs. inkongruente VR-Bedingung; 4. hohes subjektives Gedächtnisniveau vs. niedriges subjektives Gedächtnisniveau der VR-Präsentation) als Kovarianten verwendet. Diese Analyse wurde separat für jedes Item bezüglich jeder der 5 VR-Video-Präsentationen durchgeführt a. Tulpenfeld, b. Verlorene Orte, c. Kaffeehaus, d. Schottland-Küstenexpedition und f. Visualisierung der Sternennacht von Van Gogh.

Alle Ergebnisse der Kovarianzanalyse sind in den ergänzenden Tabellen 8-12 dargestellt (siehe Anhang).

Bemerkt werden muss, dass für das Tulpenfeld-Video das Item objektives Erinnerungsvermögen, also die tatsächliche korrekte Erkennung vs. inkorrekte Erkennung einzelner Details der VR-Präsentation nicht genutzt werden konnte, da alle Proband*innen die Frage richtig beantworteten und somit keine Varianz in den Daten erkennbar war.

Um weiter zu untersuchen, wie oft der präsentierte Geruch als kongruent mit der entsprechenden VR-Umgebung wahrgenommen wurde, wurden Häufigkeitstabellen verwendet.

Eine einseitige Varianzanalyse wurde durchgeführt, um zu untersuchen, welche Gerüche subjektiv als am kongruentesten bewertet wurden, und zwar für jede der 5 VR-Präsentationen separat. Die abhängige Variable war die subjektiv wahrgenommene Kongruenz des präsentierten Geruchs, und die festen Faktoren umfassten 5 experimentelle Gruppen. Zur Kontrolle für multiple Vergleiche wurden Bonferroni-Korrekturen angewendet, um die Wahrscheinlichkeit von Fehlern vom Typ 1 zu verringern.

Die Daten werden als Mittelwerte (\pm Standardabweichung) dargestellt. Statistische Analysen wurden mit JASP v. 0.11.1 (www.jasp-stats.org) durchgeführt, wobei $p < .05$ als

Signifikanzniveau festgelegt wurde.

Abbildung 7:

Darstellung der individuellen Bedingungen

Bedingungen							
objektiv kongruent	objektiv in-kongruent	subjektiv kongruent	subjektiv in-kongruent	objektiv hohes Gedächtnis niveau	objektiv niedriges Gedächtnis niveau	subjektiv hohes Gedächtnis niveau	subjektiv niedriges Gedächtnis niveau
n=19	n=75	Tulpenfeld: n=40 verlorene Orte: n=34 Kaffeehaus: n=39 Küstenexpedition: n=38 Sternennacht: n=36	Tulpenfeld: n=54 verlorene Orte: n=60 Kaffeehaus: n=55 Küstenexpedition: n=56 Sternennacht: n=58	Tulpenfeld: n=94 verlorene Orte: n=65 Kaffeehaus: n=30 Küstenexpedition: n=60 Sternennacht: n=67	Tulpenfeld: n=0 verlorene Orte: n=29 Kaffeehaus: n=64 Küstenexpedition: n=34 Sternennacht: n=27	Tulpenfeld: n=33 verlorene Orte: n=37 Kaffeehaus: n=43 Küstenexpedition: n=38 Sternennacht: n=32	Tulpenfeld: n=61 verlorene Orte: n=57 Kaffeehaus: n=51 Küstenexpedition: n=56 Sternennacht: n=62

4.5.1 Datenanalyse der EEG-Daten

Die EEG-Aufzeichnungen wurden für alle Teilnehmenden während jedem der fünf Videos durchgeführt. Es wurden jedoch nur Teilnehmer*innen aus der ersten Gruppe in der objektiv kongruenten Bedingung untersucht.

Um zu überprüfen, ob die kongruente Bedingung die Frequenzbänder (Delta, Theta, Alpha, Beta) über alle Sitzungen hinweg beeinflusst, wurde aufgrund der Stichproben-Clusterung das linear gemischte Modell für jedes Frequenzband getrennt verwendet (Oskolkov, 2020).

Sämtliche Proband*innen nahmen an allen fünf Sitzungen teil. Die abhängige Variable war das individuelle Frequenzband. Als Gruppierungsfaktor mit zufälligen Effekten diente die Anzahl der Proband*innen und die Variablen mit festen Effekten:

Kongruenz (1 = „ja“, 0 = „nein“) und Kanal (F3, F7, FZ, F4 und F8).

Es wurden diese Kanalvariablen hinzugefügt, um zu untersuchen, ob die einzelnen Kanäle sich zwischen den Frequenzbändern unterscheiden. Es wurden also vier separate Modelle erstellt, jedes für ein einzelnes Frequenzband. Für jedes Modell wurde das Akaike-Informationskriterium (AIC) ermittelt. AIC ist eine einzelne Zahl, mit der bestimmt werden kann, welches von mehreren Modellen am wahrscheinlichsten das beste Modell für einen bestimmten Datensatz ist. Das angestrebte Ergebnis ist ein möglichst niedriger AIC-Wert, der das beste Gleichgewicht zwischen Modellanpassung und Verallgemeinerbarkeit anzeigt (Zajic, 2019). Die Daten werden als Mittelwerte (\pm Standardabweichung) dargestellt. Statistische Analysen wurden mit JASP v. 0.16.1 (Univ. of Amsterdam, Niederlande: www.jasp-stats.org) durchgeführt, wobei $p < .05$ als Signifikanzniveau festgelegt wurde.

5. Ergebnisse

5.1 Basisdaten der Studienteilnehmer und deskriptive Statistik

Von 100 Teilnehmenden (37 Männer und 63 Frauen) wurden 93 in die Daten-Analyse einbezogen. Die anderen sieben Teilnehmenden (zwei Männer und fünf Frauen) konnten nicht eingeschlossen werden, da sie für eine erneute Befragung nicht zur Verfügung standen. Das durchschnittliche Alter der Teilnehmenden betrug 25,5 Jahre und lag zwischen 19 und 35 Jahren (siehe Tabelle 6).

Tabelle 6:

*Altersverteilung der Proband*innen*

Gruppe	Alter	Mittelwert	Standardabweichung
1	22-31	25,5	2,6
2	20-31	24,2	2,9
3	19-29	25,5	2,9
4	22-35	27,7	3,5
5	21-31	25,1	3,2

5.2 Auswirkungen von Kongruenz und Inkongruenz auf die Wahrnehmung der VR-Umgebung

Alle Kovarianzanalysen sind im Anhang einzusehen (siehe Tabelle 8-12).

In Hypothese 1 wurde angenommen, dass sich Proband*innen, welche die VR-Umgebungen subjektiv und objektiv als kongruenter wahrnehmen, später positiver an die Umgebung erinnern.

Im Folgenden sind zunächst die Ergebnisse für die subjektiv wahrgenommene Kongruenz von präsentierten Gerüchen und VR-Umgebung dargestellt (siehe Tabelle 7 und Abbildung 8).

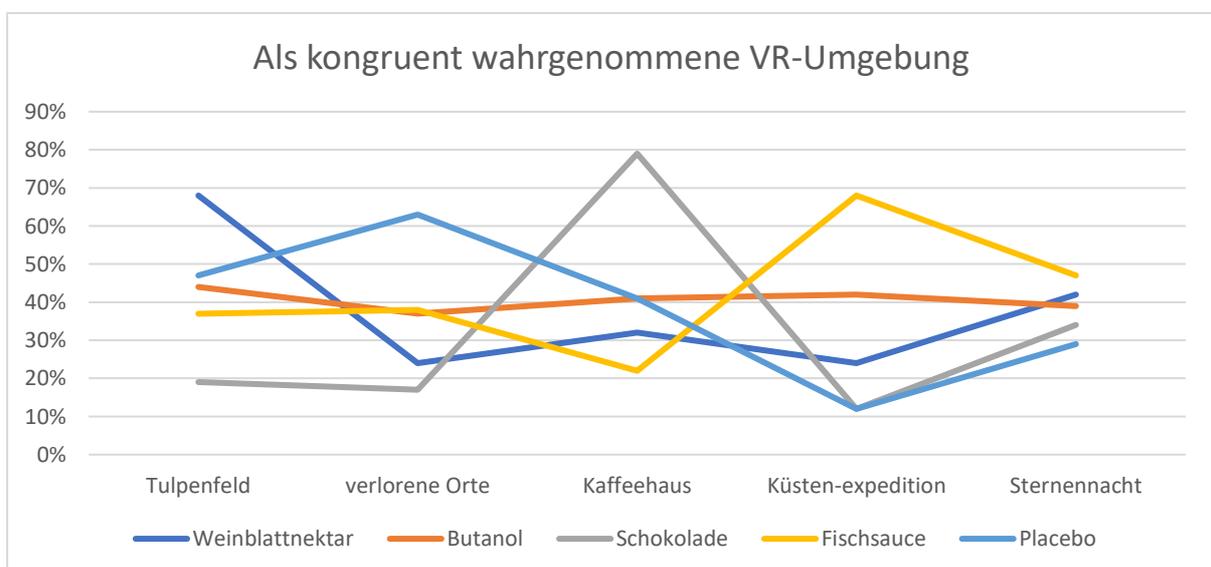
Tabelle 7:

Subjektiv empfundene Kongruenz der einzelnen Videos und Gerüche

VR-Umgebung						
Als kongruent wahrgenommen						
Präsentierter Geruch	Tulpenfeld	verlorene Orte	Kaffeehaus	Küsten-expedition		Sternennacht
Weinblattnektar	68%	24%	32%	24%	Placebo	42%
Butanol	44%	37%	41%	42%		39%
Schokolade	19%	17%	79%	12%		34%
Fischsauce	37%	38%	22%	68%		47%
Placebo	47%	63%	41%	12%		29%

Abbildung 8:

Subjektive Wahrnehmung von Kongruenz und Inkongruenz der präsentierten Gerüche



Die ANCOVA zeigt, dass bei dem Video Tulpenfeld der Geruch Weinblattnektar am häufigsten als kongruenter Geruch erkannt wurde. Am wenigsten häufig wurde von den Teilnehmenden Schokolade als kongruent wahrgenommen ($F[4,89] = 2.76$, $p = .033$; $p = .016$, Bonferroni-korrigiert).

Bei dem Video verlorene Orte ist am häufigsten der Placebo-Clip als kongruent wahrgenommen wurden. Schokolade wurde am häufigsten als inkongruent wahrgenommen ($F[4,89] = 2.7$, $p = .036$; $p = .032$, Bonferroni-korrigiert).

Für das Kaffeehaus-Video zeigte sich, dass Schokolade mit Abstand am häufigsten als kongruent wahrgenommen wurde. Am wenigsten häufig wurde Fischsauce als kongruent wahrgenommen ($F[4,89] = 4,25$, $p = .003$; für Fischsauce: $p = .004$, alle Bonferroni-korrigiert). Bei der Küstenexpedition wurde am häufigsten Fischsauce als kongruent eingeschätzt. Am seltensten wurde der Schokoladen-Geruch als kongruent eingeschätzt direkt gefolgt von dem blumigen Weinblattnektar (siehe Abbildung 8) ($F[4,89] = 4.6$, $p = .002$; für Weinblattnektar: $p = .028$, für Schokolade: $p = .004$, alle Bonferroni-korrigiert).

Im Sternennacht-Video konnte kein subjektiver Unterschied zwischen allen fünf Kontrollgruppen gefunden werden. Alle Gruppen bekamen einen Placeboclip (kein Geruch) präsentiert (siehe Abbildung 8).

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass für alle fünf Videos mit Ausnahme der verlorenen Orte immer der objektiv kongruente Geruch auch subjektiv als am kongruentesten wahrgenommen worden ist. Bei dem Video der verlorenen Orte hingegen wurde nicht Butanol am kongruentesten wahrgenommen, sondern die Kontrolle, bei der kein olfaktorischer Reiz dargeboten wurde (vergleiche Abbildung 8).

Im Folgenden sind die Ergebnisse der abgefragten Eigenschaften in der kongruenten und inkongruenten Gruppe beschrieben. Es wurden für alle Videos dieselben Eigenschaften überprüft, jedoch sind hier nur die signifikanten Ergebnisse dargestellt. Für eine vollständige Übersicht aller Kovarianzanalysen vgl. Tabelle 8-12 im Anhang.

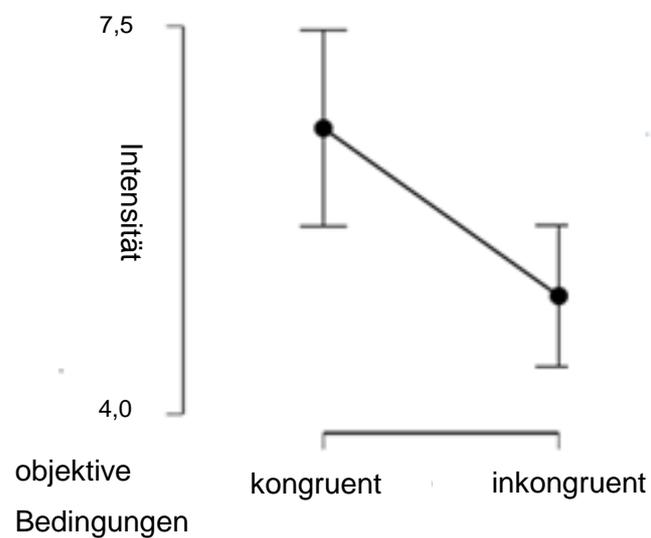
Tulpenfeld

Die VR-Präsentation wurde in der subjektiv wahrgenommenen kongruenten Bedingung als angenehmer empfunden ($F[1.90] = 10.28, p = .002$).

Die objektive Kongruenz von VR-Umgebung und Geruch wurde signifikant intensiver wahrgenommen als unter inkongruenten Bedingungen $F[1.90] = 6.08, p = .016$) (Abbildung 9).

Abbildung 9:

Tulpenfeld: Wahrnehmung der Intensität unter objektiv kongruenten und inkongruenten Bedingungen



Verlorene Orte

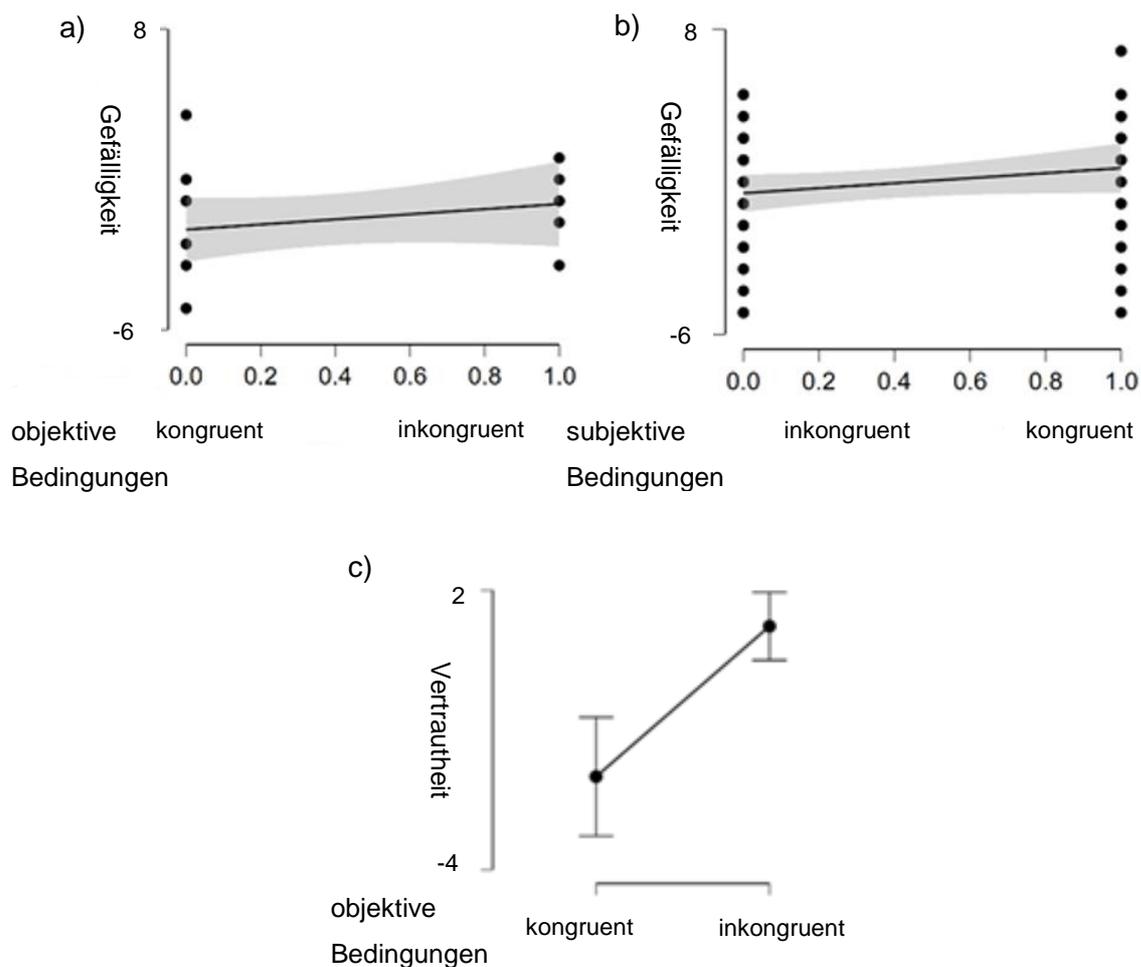
Die VR-Umgebung mit objektiv inkongruentem Geruch wurde als angenehmer empfunden ($F[1.88] = 4.2, p = .043$) als unter kongruenten Bedingungen ($F[1.88] = 4.1, p = .046$) (siehe Abbildung 10 a). Im Gegensatz dazu wurde das Video in der subjektiv wahrgenommenen kongruenten Bedingung als angenehmer empfunden als in der subjektiv inkongruenten Bedingung. ($F[1.88] = 4.1, p = .046$) (Abbildung 10 b)

Zudem wurde unter objektiv inkongruenten Geruchsbedingungen die VR-Umgebung ebenfalls als vertrauter empfunden ($F[1.88] = 17.2, p < .001$) (siehe Abbildung 10 c).

Abbildung 10:

Verlorene Orte: Empfundene Gefälligkeit und Vertrautheit unter kongruenten und inkongruenten Bedingungen

In Abbildung a) zu sehen ist die empfundene Gefälligkeit unter objektiv kongruenten bzw. inkongruenten Bedingungen. In Abbildung b) ist die Gefälligkeit unter subjektiv empfundener Kongruenz bzw. Inkongruenz dargestellt. Abbildung c) zeigt die Vertrautheit unter objektiv kongruenten und inkongruenten Bedingungen.



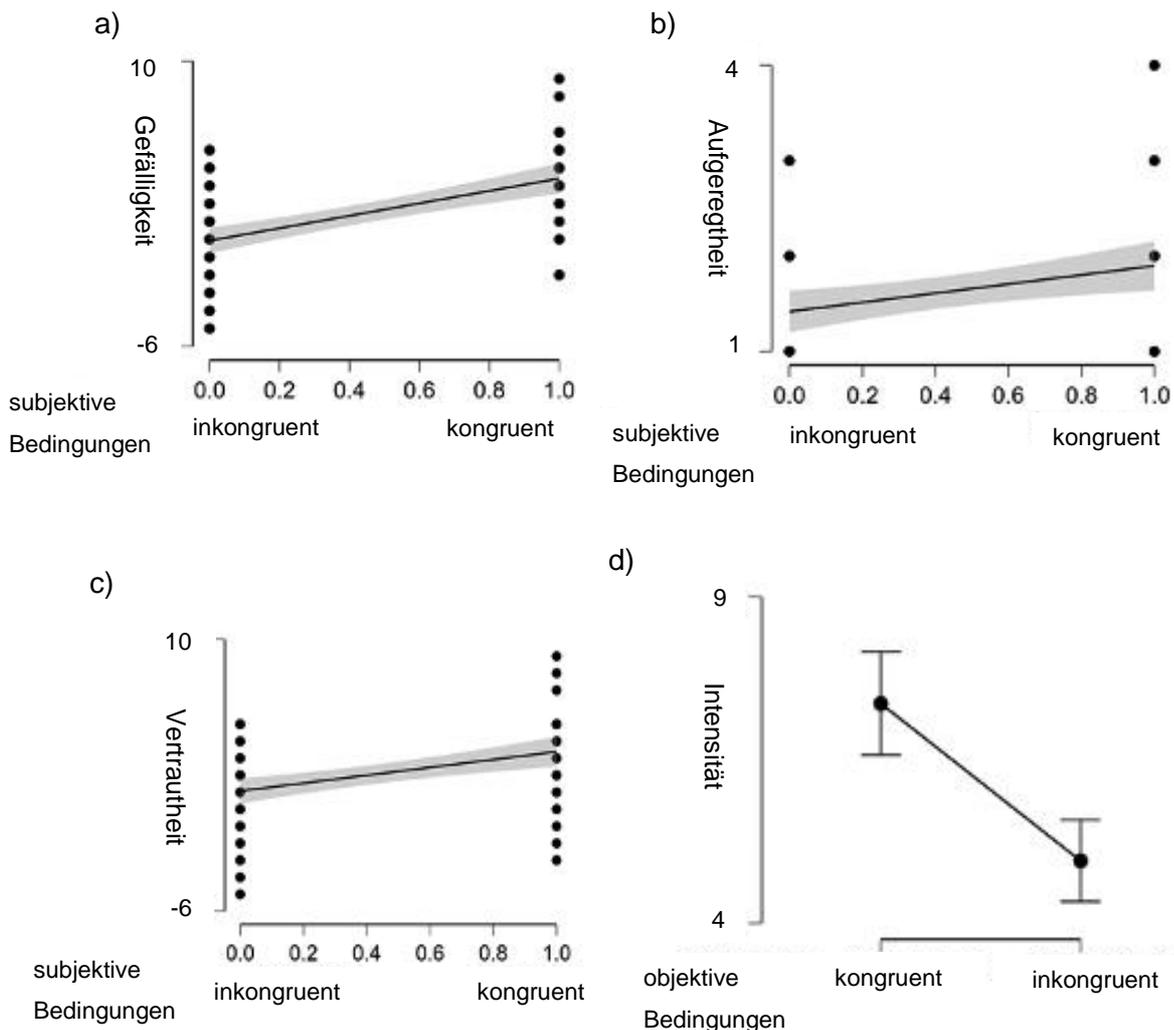
Kaffeehaus

Die subjektiv wahrgenommene Gefälligkeit wurde unter subjektiv kongruenten Bedingungen höher eingeschätzt als unter inkongruenten Bedingungen ($F[1.88] = 9.77, p = .002$) (Abbildung 11 a). Außerdem wird sie als aufregender ($F[1.88] = 25.46, p < .001$) (siehe Abbildung 11 b) und vertrauter ($F[1.88] = 11, p = .001$) (siehe Abbildung 11 c) wahrgenommen. Die Intensität des Geruchs wird in der objektiv kongruenten Bedingung als deutlich intensiver wahrgenommen als unter inkongruenten Bedingungen ($F[1.88] = 9.4, p = .003$) (siehe Abbildung 11 d).

Abbildung 11:

Kaffeehaus: Empfundene Gefälligkeit, Aufgeregtheit Vertrautheit und Intensität unter kongruenten und inkongruenten Bedingungen

In Abbildung a) dargestellt ist die Gefälligkeit, in b) die Aufgeregtheit und in c) die Vertrautheit unter subjektiv empfundener Kongruenz und Inkongruenz. In Abbildung d) zu sehen ist die wahrgenommene Intensität des Geruchs unter objektiv kongruenten bzw. inkongruenten Bedingungen.



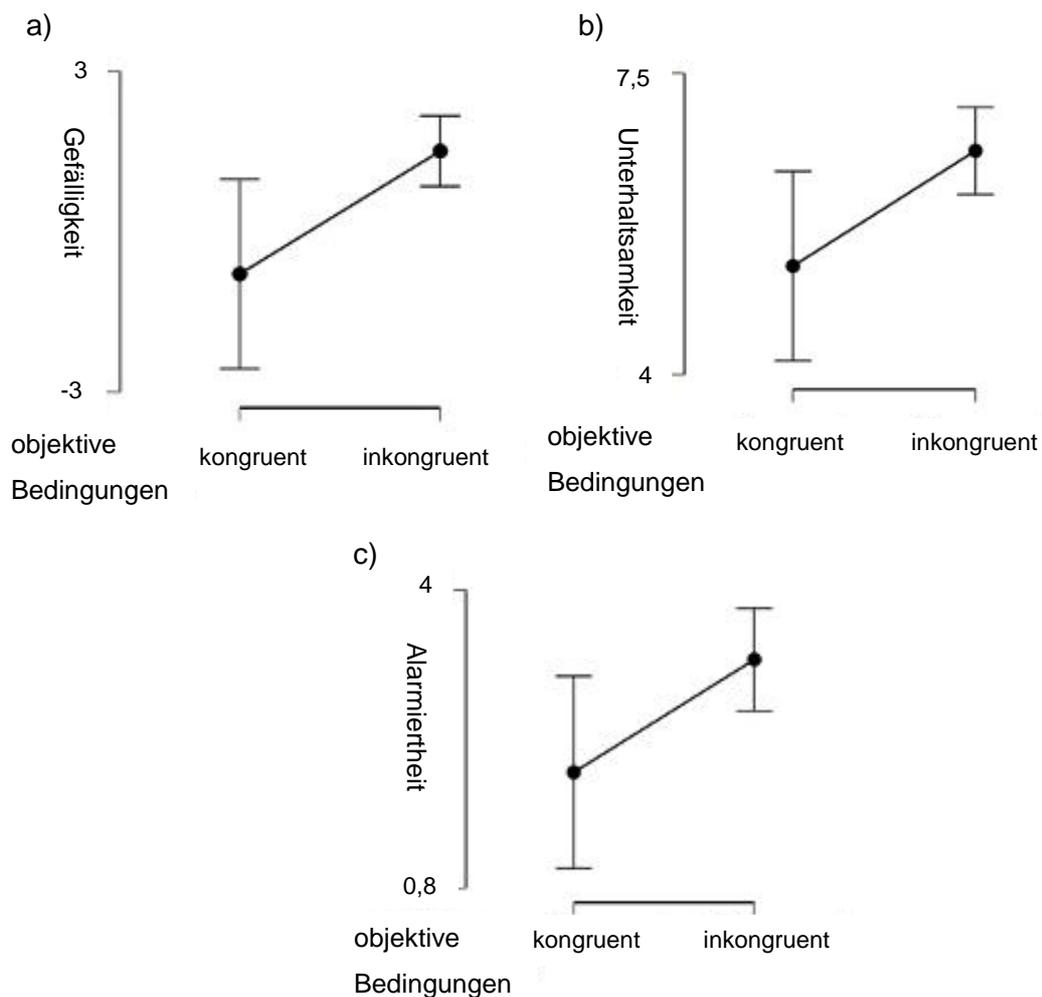
Küstenexpedition

Unter objektiv inkongruenten Bedingung schätzten die Proband*innen das VR-Erlebnis als angenehmer ($F[1.88] = 9.64, p = .003$) (siehe Abbildung 12 a) und unterhaltsamer ($F[1.88] = 6, p = .016$) (siehe Abbildung 12 b) ein als unter kongruenten Bedingungen. Auch ist die Alarmiertheit der Teilnehmenden unter objektiv inkongruenten Bedingungen deutlich höher ($F[1.88] = 5.52, p = .021$) (Abbildung 12 c).

Abbildung 12:

Empfundene Gefälligkeit, Unterhaltsamkeit sowie Alarmiertheit unter objektiv kongruenten und inkongruenten Bedingungen

In Abbildung a) zu sehen sind die Auswirkungen auf die Gefälligkeit, in b) auf die Unterhaltsamkeit und in c) auf die Alarmiertheit unter objektiv kongruenten und inkongruenten Bedingungen.

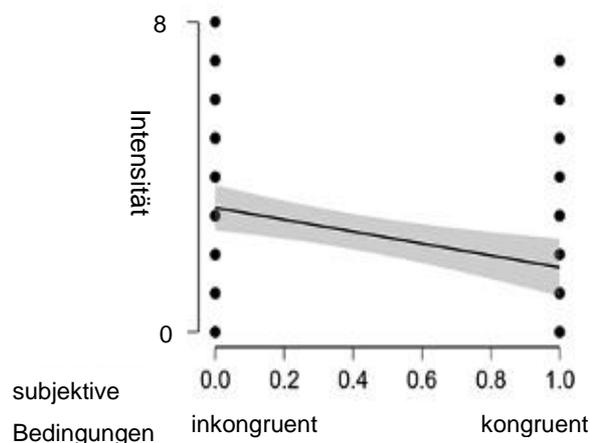


Die Sternennacht

Unter subjektiv empfundener Inkongruenz wurde die Intensität des Geruchs stärker wahrgenommen als unter subjektiv empfundener Kongruenz ($F[1.88] = 10, p = .002$) (siehe Abbildung 13). Zu beachten ist hier, dass den Teilnehmenden kein Geruch präsentiert wurde.

Abbildung 13:

Das Sternennachts-Video: Wahrgenommene Intensität des Geruchs unter subjektiv empfundener Kongruenz bzw. Inkongruenz



Zusammenfassend lässt sich sagen, dass Proband*innen, welche die VR-Umgebungen subjektiv und objektiv als kongruenter wahrnehmen, sich später nicht immer positiver an die Umgebung erinnern.

Zwar konnte für das Tulpenvideo gezeigt werden, dass unter objektiv kongruenten Duftbedingungen die VR-Umgebung intensiver wahrgenommen wurde und auch für das Kaffeehaus-Video zeigte sich, dass es unter objektiv kongruenten Bedingungen angenehmer und intensiver sowie unter subjektiv kongruenten Bedingungen als aufregender und vertrauter wahrgenommen wurde. Bei den Videos Küstenexpedition und verlorene Orte hingegen war genau das Gegenteil der Fall. Die inkongruente Duft-Situation führte zu mehr Gefälligkeit bei den Teilnehmenden. Bei dem Video verlorene Orte zeigte sich, dass zusätzlich zur Gefälligkeit auch die Vertrautheit in der objektiv inkongruenten Situation erhöht war. Des Weiteren zeigte der Versuch, dass das Video unter subjektiv kongruenten, welches nicht den objektiv kongruenten Bedingungen entsprach, als angenehmer wahrgenommen wurde. Die Küstenexpedition löste in der objektiv inkongruenten Situation zwar mehr Alarmiertheit aus, wurde jedoch auch als unterhaltsamer wahrgenommen als in der kongruenten Duftsituation. Und auch bei dem Sternennachtsvideo nahmen Teilnehmende unter subjektiv inkongruenten Bedingungen die VR-Umgebung intensiver wahr.

5.3 Auswirkungen der Gedächtnisleistung auf die Wahrnehmung in VR-Umgebungen

In Hypothese 2 wurde angenommen, dass Teilnehmende mit einer subjektiv erklärten und objektiv gemessenen besseren Gedächtnisleistung die VR-Umgebung positiver als Teilnehmende mit niedrigerer Gedächtnisleistung bewerten. Im Folgenden sind die signifikanten Ergebnisse der abgefragten Eigenschaften für ein objektiv hohes und ein subjektiv hohes Erinnerungsvermögen dargestellt. Auch hier wurden für alle Videos dieselben Eigenschaften überprüft, jedoch sind im Folgenden nur die signifikanten Ergebnisse dargestellt.

Tulpenfeld

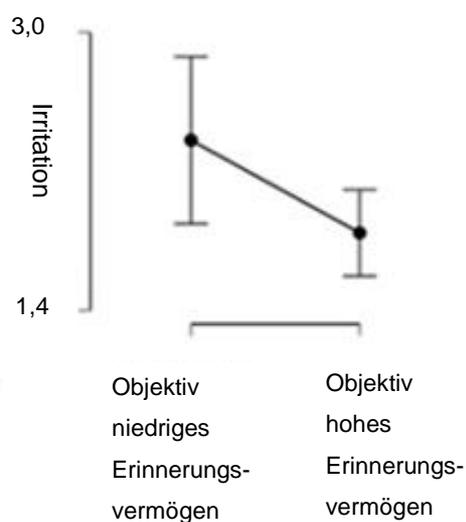
Bei der virtuellen VR-Präsentation des Tulpenfeldes wurde der Faktor "objektiv hohes bzw. niedriges Erinnerungsvermögen einzelner Videodetails" nicht als fester Faktor verwendet, da alle Teilnehmer die Frage richtig beantwortet haben.

Verlorene Orte

Proband*innen, die ein objektiv niedrigeres Erinnerungsvermögen hatten, waren irritierter ($F[1.88] = 9, p = .003$) bzw. beunruhigter ($F[1.88] = 6.38, p = .013$) als Teilnehmende mit einem objektiv höherem Erinnerungsvermögen (siehe Abbildung 14).

Abbildung 14:

Verlorene Orte: Irritation bezogen auf ein objektiv besseres bzw. ein objektiv schlechteres Erinnerungsvermögen



Kaffeehaus

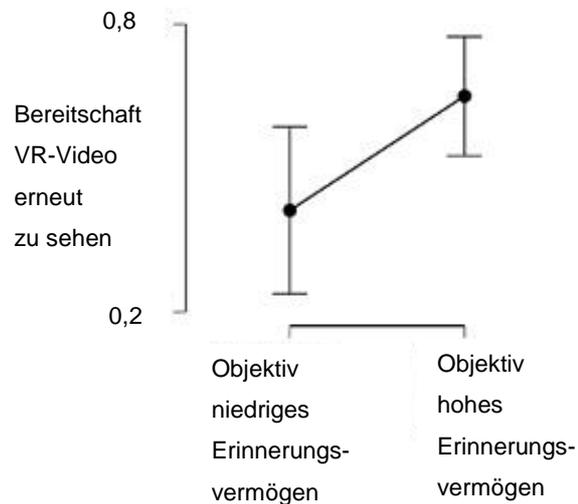
Die VR-Präsentation wurde von den Teilnehmerenden mit objektiv hohem Erinnerungsvermögen als weniger kongruent bewertet ($F[1.88] = 5.49, p = .021$).

Küstenexpedition

Es ist zu sehen, dass die Bereitschaft, sich das Video erneut anzuschauen, bei objektiv höherem Erinnerungsvermögen größer ist als bei objektiv niedrigerem Erinnerungsvermögen ($F[1.88] = 6.76, p = .011$) (siehe Abbildung 15 unten rechts).

Abbildung 15:

Küstenexpedition: Bereitschaft, das Video erneut zu schauen in Relation zu der objektiv besseren bzw. schlechteren Gedächtnisleistung



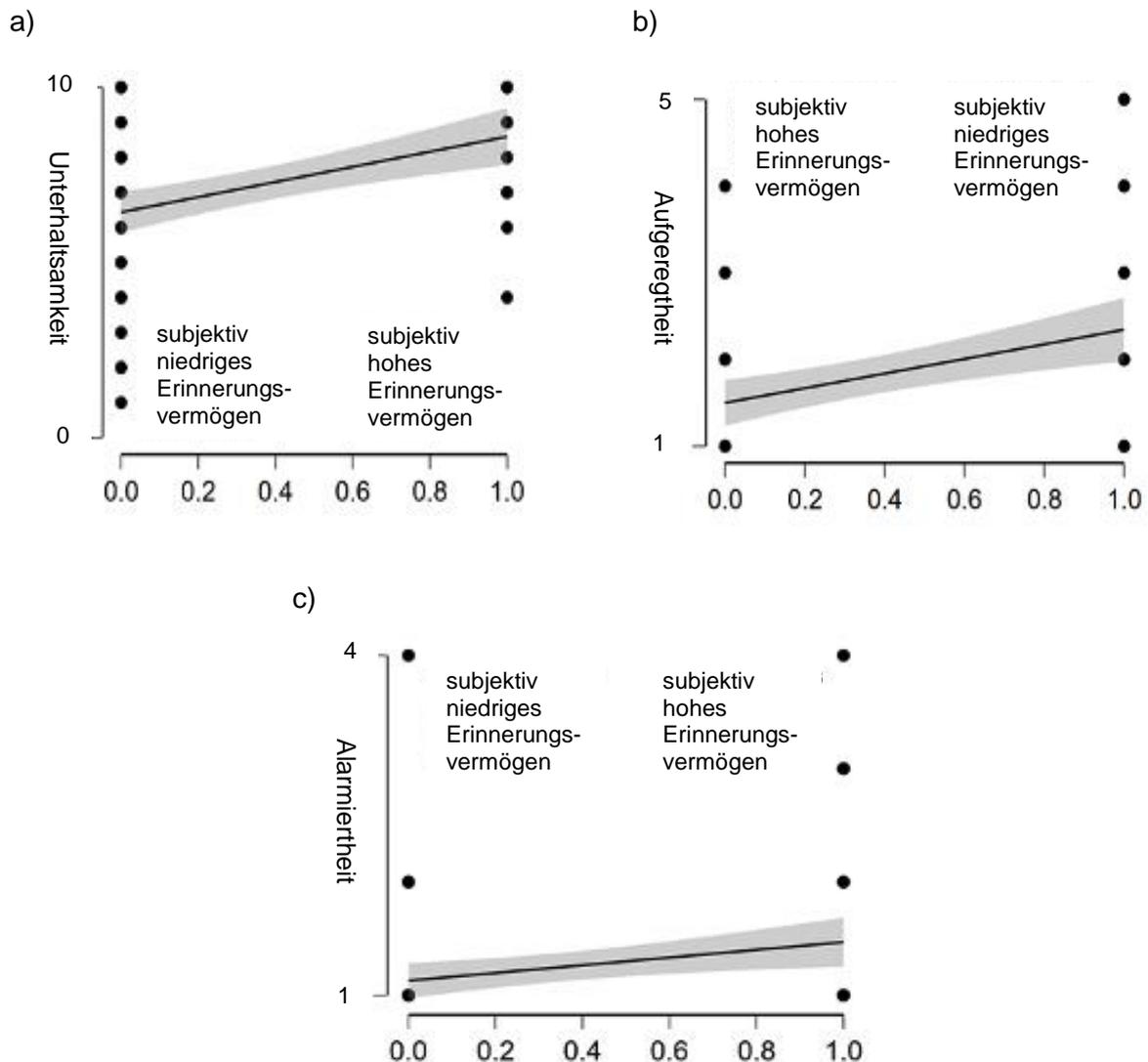
Sternennacht

Außerdem ging eine bessere subjektive Gedächtnisleistung mit einer höheren Unterhaltsamkeit ($F[1.88] = 22.3, p < .001$) (Abbildung 16 a), Aufgeregtheit ($F[1.88] = 13.76, p < .001$) (siehe Abbildung 16 b) sowie einer höheren Alarmiertheit einher ($F[1.88] = 7.46, p = .008$) (siehe Abbildung 16 c).

Abbildung 16:

Die Sternennacht: Hohes bzw. niedrigeres subjektives Erinnerungsvermögen und die Auswirkung auf Aufgeregtheit, Unterhaltsamkeit und Alarmiertheit

In Abbildung a) zu sehen sind die Auswirkungen auf die Unterhaltsamkeit, in b) auf die Aufgeregtheit und in c) auf die Alarmiertheit bei niedrigem bzw. hohem subjektivem Erinnerungsvermögen.



Zusammenfassend lässt sich sagen, dass Teilnehmenden mit einem subjektiv erklärten und objektiv gemessenen besseren Gedächtnisleistung die VR-Umgebung nicht konstant positiver als Teilnehmende mit niedrigerem Erinnerungsvermögen bewerteten.

Bei dem Küstenexpeditionsvideo konnte gezeigt werden, dass Teilnehmende mit einem objektiv höherem Erinnerungsvermögen eher geneigt waren sich das Video erneut anzuschauen.

Und auch bei dem verlorene-Orte-Video waren Proband*innen, mit einem objektiv höherem Erinnerungsvermögen weniger irritiert und beunruhigt. Jedoch gaben Proband*innen beim Kaffeehaus-Video mit objektiv besserem Erinnerungsvermögen an, dass es weniger kongruent sei. Auch bei dem Sternennacht-Video fanden die Proband*innen, mit subjektiv hohem Erinnerungsniveau, dass das Video zwar unterhaltsamer und aufregender war, jedoch auch mit einer höheren Alarmiertheit einhergeht. Demnach muss Hypothese 2 verworfen werden.

5.4 Auswirkungen der olfaktorischen Stimulation in VR-Umgebungen auf das EEG

Hypothese 3 besagt, dass Kongruenz von olfaktorischen Reizen in VR-Umgebungen zu einer Zunahme bzw. Rechtsverschiebung der Leistungsdichtespektren in niedrigen EEG-Wellenbereichen (Delta, Theta, Alpha) führt, wohingegen bei Inkongruenz eher eine Abnahme bzw. Linksverschiebung der Leistungsdichte angenommen wird.

Keines der vier Modelle zeigte einen Einfluss der Kongruenz bzw. Inkongruenz auf die Hirnfrequenzen (für alle Frequenzen: $F[1,76] = .34$, $p = .628$). Es konnte weder eine Rechts- noch eine Linksverschiebung festgestellt werden.

Außerdem wurde kein Unterschied zwischen einzelnen Elektroden festgestellt (für alle Elektroden: $F[4,NA] = 0.24$, $p = .916$).

Alle erhaltenen AICs waren hoch mit minimalen Unterschieden (Für das Delta-Modell AIC: 118986,48; für das Theta-Modell AIC: 120099,86; für das Alpha-Modell AIC: 121659,81; für das Beta-Modell AIC: 124951,63). Dies spricht für eine fehlende Signifikanz.

Tabelle 8:

Ergebnisdarstellung für die einzelnen Frequenzbereiche des EEGs

	Delta	Theta	Alpha	Beta
Gültig	1950	1950	1950	1950
Fehlend	0	0	0	0
Mittelwert	$1.118 \times 10^{+11}$	$1.489 \times 10^{+11}$	$2.226 \times 10^{+11}$	$5.200 \times 10^{+11}$
Standardabweichung	$4.919 \times 10^{+12}$	$6.554 \times 10^{+12}$	$9.797 \times 10^{+12}$	$2.289 \times 10^{+13}$
Minimum	3.534×10^{-4}	0.002	0.002	0.004
Maximum	$2.172 \times 10^{+14}$	$2.894 \times 10^{+14}$	$4.326 \times 10^{+14}$	$1.011 \times 10^{+15}$

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass sich kein Zusammenhang zwischen Kongruenz bzw. Inkongruenz auf die Hirnfrequenzen fand und ebenso ließen sich keine spezifischen Effekte zwischen einzelne Elektroden erkennen. Somit bestätigt sich die Hypothese nicht.

6. Diskussion

Untersucht wurde, ob Proband*innen, welche die VR-Umgebungen subjektiv und objektiv als kongruenter wahrnehmen, sich später positiver an die Umgebung erinnern. Zudem lag ein Fokus darauf, ob Teilnehmende mit einer subjektiv erklärten und objektiv gemessenen besseren Gedächtnisleistung die VR-Umgebung positiver bewerten würden als Teilnehmende mit niedrigerer Gedächtnisleistung.

Zusätzlich wurde analysiert, ob Kongruenz von olfaktorischen Reizen in VR-Umgebungen zu einer Zunahme bzw. Rechtsverschiebung der Leistungsdichtespektren in niedrigen EEG-Wellenbereichen (Delta, Theta, Alpha) führt, bzw. Inkongruenz eher zu einer Abnahme bzw. Linksverschiebung der Leistungsdichte führt.

6.1 Diskussion der Ergebnisse

6.1.1 Wahrnehmung der VR-Umgebung unter kongruenten Bedingungen

Die primäre Hypothese der Studie ging davon aus, dass Proband*innen, die subjektiv und objektiv die VR-Umgebung als kongruenter wahrnehmen, diese positiver erinnerten. Dass Übereinstimmungen von Gerüchen mit VR die Wahrnehmung beeinflussen, fand sich bereits in vorangegangenen Studien (Rihm et al., 2014; Seo et al., 2010, 2014; Seo & Hummel, 2011). Es zeigte sich, dass olfaktorische Reize in der Lage sind, die Hedonik einer Situation zu modulieren (Demattè et al., 2007; Locke & Grimm, 1949).

Im Speziellen konnte bereits in mehreren Studien gezeigt werden, dass Kongruenz von Geruch und Umgebung zu einer positiveren Wahrnehmung führen (Baus et al., 2019; Liu et al., 2019; Micaroni et al., 2019; Niedenthal et al., 2019; Rihm et al., 2014; Seo et al., 2014; Seo & Hummel, 2011; Streeter & White, 1986). Diese Erkenntnisse konnten mit dieser Studie für die angenehmen Videos belegt werden. Das Tulpenfeld und das Kaffeehaus wurden in den kongruenten Duftkonstellationen, welche ebenfalls angenehm waren, positiver bewertet als in der inkongruenten Situation.

Im Hinblick auf die erste Hypothese zeigte sich, dass Proband*innen unter kongruenten Bedingungen die Intensität des Duftes beim Tulpenfeld-Video, welcher dem angenehmen Weinblattnektar entsprach, intensiver wahrnahmen als in der inkongruenten Situation. Auch beim Kaffeehaus-Video war die Gefälligkeit für die Proband*innen unter kongruenten Bedingungen höher. So wurde die VR-Umgebung beim Kaffeehaus-Video unter subjektiv kongruenten Bedingungen als aufregender und vertrauter wahrgenommen und unter objektiv kongruenten Bedingungen als intensiver.

Im Hinblick auf die aktuelle Studienlage scheinen sich die Studien-Ergebnisse bis hier hin einzufügen. Widersprüchliche Ergebnisse fanden jedoch Baus & Bouchard, (2017), die keinen Effekt auf die Wahrnehmung der VR-Umgebung durch angenehme Gerüche fanden. Im Speziellen haben die Proband*innen den angenehmen Geruch sogar als weniger intensiv wahrgenommen. Fraglich bei dieser Studie war jedoch, ob der fehlende Effekt auf ein mangelndes Erkennen bzw. mangelnde Wahrnehmung des Geruchs durch die Proband*innen zurückzuführen war.

Die Ergebnisse deuten auch darauf hin, dass sich kongruente angenehme Gerüche positiv auf die Wahrnehmung in VR-Umgebungen auswirken, was in diesem Zusammenhang an einer größeren und somit aussagekräftigeren Stichprobe gezeigt werden konnte.

Es zeigte sich entgegen der Annahme der ersten Hypothese, dass zu dem unangenehmen Video Küstenexpedition die objektiv inkongruente Duftsituation als angenehmer wahrgenommen wurde. Das bedeutet, dass die kongruente Duftsituation, hier Fischsauce, nicht zu einer Verbesserung der Wahrnehmung beitrug.

Auch bei dem Video der verlorenen Orte führte die inkongruente Duftkonstellation zu mehr Gefälligkeit. Außerdem zeigte sich, dass zusätzlich zur Gefälligkeit auch die Vertrautheit in der objektiv inkongruenten Situation erhöht war.

Diese Ergebnisse widersprechen früheren Studien (Flavián et al., 2021; Micaroni et al., 2019; Niedenthal et al., 2019; Streeter & White, 1986), in welchen Kongruenz als Prädiktor für eine verbesserte Wahrnehmung fungierte.

Boesveldt und Kolleg*innen (2010) konnten zeigen, dass manche Gerüche mit Aversion und Ekel und somit einer niedrigeren Gefälligkeit einhergingen. Butanol als unangenehm stechender Geruch und auch Fischsauce, die vor allem in unserem Kulturkreis als unangenehm riechend wahrgenommen wird, scheint trotz der vorherrschenden Kongruenz die Wahrnehmung der Proband*innen negativ zu beeinflussen. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass, auch wenn sich Kongruenz im Allgemeinen positiv auf VR-Umgebungen auswirkt (Archer et al., 2022) auch die Gefälligkeit der verabreichten Düfte Einfluss auf die Wahrnehmung der Situation hat. Insbesondere mehrere unangenehme Stimuli wie eine unangenehme VR-Umgebung zusätzlich zu einem unangenehmen Duft zeigten in dieser Studie einen eher negativen Effekt auf die Hedonik der Wahrnehmung des Erlebens.

Ein weiterer möglicher Erklärungsansatz ist, dass unter unangenehm kongruenten Bedingungen eine emotionale Vertiefung verhindert wird und somit das Erleben der unangenehmen Videos zusätzlich zu den unangenehmen Düften besser verarbeitet werden kann (Flavián et al., 2021). Nach aktuellem Stand der Forschung haben bis her nur Carulli und

Kollegen (2016) gezeigt, dass auch inkongruente Düfte zu einer verbesserten und positiveren Wahrnehmung der VR-Umgebung beitragen.

Erwähnenswert ist ebenfalls, dass das verlorene Orte-Video das einzige Video war, bei dem die Teilnehmenden einen inkongruenten Duft als kongruenter wahrgenommen haben. Dies kann ein Hinweis darauf sein, dass die subjektiv bewertete Kongruenz einen stärkeren Effekt hat als die objektive Kongruenz. So fanden Teilnehmende das Video Kaffeehaus unter kongruenten Bedingungen spannender, intensiver und vertrauter, während das Video der verlorenen Orte unter den subjektiv kongruenten, welches nicht den objektiv kongruenten Bedingungen entsprach, als angenehmer bewertet wurde. Auch legen diese Erkenntnisse die Vermutung nahe, dass die Wahrnehmung von Kongruenz „interindividueller Varianz“ (Carulli et al., 2016) unterliegt.

Die Ergebnisse lassen darauf schließen, dass objektiv kongruente Bedingungen nicht unbedingt zu einer positiveren Wahrnehmung der VR führen, sondern in diesem Fall subjektiv inkongruente Wahrnehmungen zu positiveren Bewertungen der Situation führen. Was die Fragen der individuellen Wahrnehmung von Kongruenz und Inkongruenz aufwirft. Dass Subjektivität eine wichtige Rolle bei der VR-Wahrnehmung spielt, konnten Herrera und Kolleg*innen 2006 zeigen.

Hier sollten zukünftige Studien die vorliegenden Ergebnisse durch größere Stichproben auch im Hinblick auf interindividuelle Varianz in der Wahrnehmung von Kongruenz weiter untersuchen.

Zusätzlich wurde die Küstenexpedition von den Teilnehmenden in der objektiv inkongruenten Situation als unterhaltsamer und alarmierender wahrgenommen als in der kongruenten Duftsituation, die dem Fischgeruch entsprach. Wenn man davon ausgeht, dass eine höhere Alarmiertheit auch mit einem höheren Präsenzsinn einhergeht, widerspricht das auch Erkenntnissen von Baus & Bouchard, (2017). Diese fanden, dass der Präsenzsinn bei unangenehmen Düften höher ist, was hier der kongruenten Situation mit der Fischsauce entspräche.

Kognitive Kontrolle und Wachsamkeit stehen in enger Beziehung (Schneider, 2020). Dies könnte ein Erklärungsansatz sein, weshalb das Video Küstenexpedition in der inkongruenten Bedingung mehr Alarmiertheit bei den Proband*innen auslöste.

Die Ergebnisse zum Sternennacht-Video zeigen, dass das Video unter subjektiv inkongruenten Bedingungen als intensiver wahrgenommen wurde. Es lässt sich daraus

schließen, dass die überraschende Inkongruenz zwischen visueller und olfaktorischer Umgebung zu einer erhöhten Aufmerksamkeit führt.

Herrmann & Kolleg*innen (2013) fanden heraus, dass kongruente Reizbedingungen zu einer flüssigeren Verarbeitung führen, was positive Effekte auf die Wahrnehmung hat. Somit kann davon ausgegangen werden, dass es nicht in erster Linie um die Gefälligkeit des Reizes geht, sondern viel mehr um Kongruenz multisensorischer Reize (Spangenberg et al., 2005). Die vorliegenden Ergebnisse geben jedoch einen Hinweis darauf, dass die Gefälligkeit von sowohl olfaktorischen als auch visuellen Reizen in der VR-Umgebung zu unterschiedlichen Bewertungen der Wahrnehmungen führen kann.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Wahrnehmung von VR-Umgebungen durch vielfache Effekte beeinflusst wird.

Es zeigte sich, dass kongruente Bedingungen nicht ausschließlich zu einer positiveren Wahrnehmung führen. Auch nicht übereinstimmende inkongruente visuelle und olfaktorische Reize können die Gefälligkeit der Wahrnehmung erhöhen.

Hier braucht es weitere Studien mit größeren Stichproben, um die Effekte von Kongruenz bzw. Inkongruenz und angenehmen bzw. unangenehmen olfaktorischen Reizen auf die Wahrnehmung von VR-Umgebungen weiter zu untersuchen. Speziell sollte hier auch eine interindividuelle Bewertung der Gefälligkeit der einzelnen Duftreize berücksichtigt werden.

6.1.2 Einfluss der Gedächtnisleistung auf Wahrnehmung der VR-Umgebung

Obwohl VR-Umgebungen in Bezug auf Wissenserwerb und Gedächtnisleistung ein vielversprechendes Werkzeug zu sein scheinen, sind die Auswirkungen und Abläufe von Lernprozessen in VR-Umgebungen und die Übertragbarkeit in reale Situationen noch weitestgehend unerforscht (Smith, 2019). Man fand Hinweise, dass eine erhöhte Immersion und ein höherer Präsenzsinn mit einer besseren Gedächtnisleistung einherging (Smith, 2019; Smith & Mulligan, 2021).

In den letzten Jahren wurde insbesondere untersucht, inwieweit VR-Umgebungen eine adäquate Möglichkeit bieten, experimentelle Studien in realen Situationen zu ersetzen und inwieweit diese dort gewonnenen Ergebnisse und Lerninhalte übertragbar waren auf echte Konditionen und Situationen. Im Speziellen wurde geprüft, ob in VR-Umgebungen gelernte Inhalte in reale Situationen übertragbar waren und wie hoch der Nutzen dieses digitalen Wissenserwerbs in der Realität war (Harman et al., 2017; Schöne et al., 2019; Smith & Mulligan, 2021).

In dieser Studie sollte untersucht werden, ob es andersherum ebenfalls Effekte gibt, also die Gedächtnisleistung Einfluss auf die Wahrnehmung in VR-Umgebungen hat. Bis zum jetzigen Zeitpunkt stellt die Fragestellung vorliegender Studie, ob eine bessere Gedächtnisleistung zur positiveren Wahrnehmung von VR-Umgebungen beiträgt, ein Novum in der Forschung dar. In Studien fanden sich Hinweise, dass das Gedächtnis Einfluss auf die Wahrnehmung von Erinnerungen hat (Kang et al., 2011; Pan et al., 2013).

Dies konnte bestätigt werden. Allerdings hat sich die zweite Hypothese, welche besagt, dass die Teilnehmenden mit einer subjektiv erklärten und objektiv gemessenen besseren Gedächtnisleistung die VR-Umgebung positiver bewerten, nicht ausschließlich bestätigt.

So sagten die Teilnehmenden, die noch viel Detailwissen präsent hatten, beim Küstenexpeditions-Video, dass sie eher dazu geneigt seien, sich den Film erneut anzuschauen, was auf eine positivere Wahrnehmung und somit Bewertung hindeutet. Hier kann vermutet werden, dass Teilnehmende, welche ein höheres subjektives Erinnerungsvermögen angaben, auch ein höheres Präsenzgefühl während der einzelnen VR-Umgebungen hatten, da Präsenzsinn mit Konzentration und dem Gefühl der Anwesenheit in der Situation einhergeht. Dies bestätigten Studienergebnissen von Smith 2019 und Smith und Mulligan 2021, welche zeigten, dass ein höherer Präsenzsinn positive Auswirkungen auf das Gedächtnis hat.

Auch bei dem Video der verlorenen Orte zeigte sich, dass Proband*innen, die sich objektiv an mehr Details erinnern, weniger irritiert und beunruhigt waren.

Bei dem Sternennacht-Video hingegen gaben Proband*innen mit subjektiv hohem Erinnerungsniveau an, dass das Video zwar unterhaltsamer sei, jedoch auch eine höhere Alarmiertheit auslöse. Alarmiertheit ist in erster Linie nicht als positiv zu bewerten. Es geht zwar mit einer höheren Aufmerksamkeit einher, jedoch auch mit dem Gefühl von Bedrohung und Verunsicherung. Möglicherweise war das Video im Vergleich zu den anderen Videos zu abstrakt, da es keine reale Situation darstellte, sondern den Zuschauenden in eine Zeichnung eintauchen ließ. Zusätzlich stellt das Gemälde, in welches die Proband*innen eintauchten, ein verlassenes Dorf bei Nacht dar, was gemeinsam mit den dunklen Farben und der einsamen Atmosphäre ein Erklärungsansatz für die erhöhte Alarmiertheit ist.

In diesem Zusammenhang ist interessant, dass die Gedächtnisleistung der Teilnehmenden im Vorhinein nicht unabhängig vom experimentellen Setting geprüft wurde. Die Gedächtnisleistung wurde nur in Addition olfaktorischer Beeinflussung unter Versuchsbedingungen getestet.

Man weiß, dass durch Geruch ausgelöste Erinnerungen emotional stärker vernetzt sind als durch andere Sinnesmodalitäten ausgelöste Erinnerungen (Herz & Cupchik, 1995; Herz & Engen, 1996; Herz et al., 2004). Es kann diskutiert werden, ob die Ergebnisse einen Hinweis darauf geben, dass Menschen mit einem besseren Erinnerungsvermögen die VR-Umgebung allgemein intensiver wahrnehmen und somit verstärkt emotional. Mit einer verstärkten Emotionalität steigen jedoch im selben Maße positive wie negative Wahrnehmungen. Wenn davon ausgegangen wird, dass diese Annahme zutrifft, bleibt unklar, wieso bei den unangenehmen Videos Küstenexpedition und verlorene Orte nicht ähnliche Ergebnisse gefunden wurden. Bei den verlorenen Orten scheint ein hohes Erinnerungsvermögen eher als protektiver Faktor vor unangenehmer Wahrnehmung zu wirken. So gaben Proband*innen mit hohem subjektiven Erinnerungsvermögen an, dass sie weniger irritiert waren. Und auch bei dem Küstenexpeditions-Video gaben Teilnehmende mit objektiv hohem Erinnerungsvermögen an, dass sie eher geneigt seien, das Video erneut zu schauen im Vergleich zu der Gruppe mit niedrigerer Gedächtnisleistung.

Beim Kaffeehaus-Video gaben Proband*innen mit objektiv besserem Erinnerungsvermögen an, dass es weniger kongruent sei. Hier ist jedoch fraglich, ob die Wahrnehmung der Inkongruenz in der als kongruent erachteten Situation nicht korrekter ist.

Für das Kaffeehaus-Video wurde Schokolade als kongruente Duftsituation gewählt. Schokolade ist zwar ein passender Geruch, jedoch nicht primär kaffeeartig. Außerdem beschrieben einige Proband*innen, dass der Schokoladen-Geruch sehr künstlich roch, was die Kongruenzwahrnehmung eventuell beeinflusst haben könnte.

Es könnte also gezeigt werden, dass sowohl das subjektiv als auch das objektiv höhere Erinnerungsvermögen zwar Einflüsse auf die Wahrnehmung in VR-Umgebungen hat, allerdings nicht ausschließlich positive.

Insgesamt lässt sich festhalten, dass Gedächtnis und Geruch in VR-Umgebungen ein bisher weitgehend unerforschtes Feld sind. Die Mechanismen der Wahrnehmung von VR-Umgebungen sind komplex und scheinen von multiplen Faktoren wie zum Beispiel Präsenz, Immersion und wie in dieser Studie festgestellt werden konnte, auch von der Gedächtnisleistung abzuhängen.

Die Ergebnisse der vorliegenden Studie sind hinsichtlich der Gedächtnisleistung nicht eindeutig und sollten deshalb an einer größeren Stichprobe weiter untersucht werden. Zudem könnte es in dieser Studie zu Verzerrungen bei der Stichprobenziehung gekommen sein, da die Charakteristika der Stichprobe nicht denen der Allgemeinbevölkerung entsprachen. Insbesondere sollte das Erinnerungsvermögen der Teilnehmenden vorher objektiv getestet werden.

6.1.3 Spezifische EEG-Veränderungen in VR-Umgebungen

Die dritte These lautete, dass Kongruenz von olfaktorischen Reizen in VR-Umgebungen zu einer Zunahme bzw. Rechtsverschiebung der Leistungsdichtespektren in niedrigen EEG-Wellenbereichen (Delta, Theta, Alpha) führt, wohingegen bei Inkongruenz eher eine Abnahme bzw. Linksverschiebung der Leistungsdichte angenommen wird.

Es ist mittlerweile bekannt, dass olfaktorische Stimulation Veränderungen der Hirn-Aktivität im EEG hervorrufen (Lorig & Schwartz, 1988; Mancini et al., 2021; Martin, 1998). Jedoch variieren die Frequenzbereiche, in welchen die Veränderungen auftreten, von Studie zu Studie, was allgemeine Schlussfolgerungen erschwert. Ein erheblicher Teil der Variabilität der Daten wird durch methodische Unterschiede verursacht (Martin, 1998). So unterscheiden sich die EEG-Aufzeichnungsgeräte, die Intensität und Stärke der verwendeten Gerüche, wie auch die Darbietungsform der Düfte. All diese Faktoren führen zu Problemen bei der Vergleichbarkeit und Deutung der Resultate (Martin, 1998).

Man weiß mittlerweile, dass olfaktorische Stimulation Veränderungen in jedem Frequenzbereich hervorruft (Martin, 1998; Perl et al., 2016). Zusätzlich gibt es Hinweise darauf, dass die Theta-Oszillation am stärksten durch olfaktorische Stimuli beeinflusst wird (Martin, 1998)

Auch konnte gezeigt werden, dass man anhand spezifischer Muster ablesen kann, ob ein Geruch als angenehm bzw. unangenehm wahrgenommen wird (Di Flumeri et al., 2016)

Andere Studien wiesen spezifische EEG-Veränderungen durch bestimmte Gerüche nach. So konnte Orchideen-Duft die Alpha-Aktivität und die Beta-Aktivität steigern, wohingegen Rosen-Duft eher Effekte im Beta-Wellen Bereich zeigte (Kim, 2016). Mancini & Kolleg*innen (2021), konnten diese spezifischen Effekte auch für die Verabreichung von Duftstoffen in VR-Umgebungen nachweisen. Die EEG-Daten ließen darauf schließen, dass Teilnehmende während der gleichzeitigen Verabreichung von Lavendelduft mehr kognitive Ressourcen zur Lösung einer Aufgabe benötigten als während der Verabreichung von Zitronenduft. Die selbst angegebene Gefälligkeit ergab jedoch zwischen den beiden Bedingungen keinen Unterschied. Entgegen der aufgestellten dritten Hypothese konnte keine Zunahme bzw. Rechtsverschiebung der Leistungsdichtespektren in niedrigen EEG-Wellenbereichen bei kongruenter olfaktorischer Stimulation festgestellt werden. Ebenso wenig wurde bei Inkongruenz eher eine Abnahme bzw. Linksverschiebung der Leistungsdichte erfasst.

In der Studie konnten überdies keine Unterschiede zwischen einzelnen Ableitungspositionen festgestellt werden. Alle erhaltenen AICs waren hoch, mit minimalen Unterschieden zwischen den Werten. Ebenso ist anzunehmen, dass die EEGs einer zu großen Varianz unterlagen und ein niedriges Signal-Rausch-Verhältnis dazu führte, dass keine signifikanten Ergebnisse

festgestellt werden konnten. Für zukünftige Untersuchungen wäre es eine Überlegung, die Beweglichkeit des Kopfes zunächst nur in einer Ebene zuzulassen. So ließe sich das Signal-Rausch-Verhältnis durch reduzierte Bewegungsartefakte verbessern. Man konnte während der EEG-Aufzeichnungen deutlich erkennen, dass die EEG-Ableitungen hierdurch massiv beeinflusst wurden.

6.2 Diskussion der Methoden

Abhängigkeit der Ergebnisse von Anzahl, Alter und Geschlecht

Die Studie schloss 100 Proband*innen ein. Es wurde im Vorhinein entschieden, dass ausschließlich gesunde Proband*innen ohne Vorerkrankungen teilnehmen dürfen. Der Altersdurchschnitt lag bei 25,5 Jahren. Das niedrige Alter der Teilnehmenden kam primär durch die Verfügbarkeit zustande, da vor allem Studierende zeitliche Kapazitäten und Interesse an der Teilnahme der Studie hatten. Auch der Fakt, dass Gesundheit der Proband*innen Voraussetzung war, senkte simultan den Altersdurchschnitt. Für eine Evaluierung der Ergebnisse sowie eine höhere Validität der Studie empfiehlt es sich, die Studie erneut mit einem größeren, repräsentativen Proband*innen-Kollektiv durchzuführen.

Von den 100 Proband*innen waren 37 Männer und 63 Frauen. In zahlreichen früheren Studien fand sich, dass es Unterschiede im Riechvermögen zwischen Männern und Frauen gibt. Schon 1899 publizierten Toulouse und Vaschide, dass Frauen eine bessere olfaktorische Wahrnehmung, Diskrimination sowie Sensibilität aufweisen als Männer. 2007 konnte dies in einer Studie mit über 3000 Teilnehmern erneut gezeigt werden (Hummel et al., 2007). Ein entscheidender Unterschied zwischen Männern und Frauen findet sich in den anatomischen Charakteristika. So haben Frauen in der Regel kleinere Nasen, was zu weniger Luftstrom und somit weniger Luftvolumen an der Riechschleimhaut führt (Hornung & Leopold, 1999). Das führt zu einer erhöhten Konzentration von Duftmolekülen, was die verbesserte Riechfähigkeit partiell erklären kann. Ein weiterer Unterschied der Geruchswahrnehmung findet sich in der unterschiedlichen Physiologie. Frauen unterliegen anderen hormonellen Regelkreisläufen als Männer. Es konnte gezeigt werden, dass Frauen zum Zeitpunkt ihres Eisprungs ein deutlich besseres Riechvermögen aufweisen als zu jedem anderen Tag des Zyklus (Brand & Millot, 2001; Dalton et al., 2002). In dieser Studie haben deutlich mehr Frauen teilgenommen als Männer. Interessant wäre, ob beispielsweise die Wahrnehmung der Intensität der Düfte zum Zeitpunkt des Eisprungs erhöht war und somit die Ergebnisse verfälscht hat.

Überdies ist auch für diese Studie interessant, dass Frauen eine höhere Fähigkeit der emotionalen Verknüpfung von Gedächtnis und Geruchsreizen zeigen. So sind Geruchserinnerungen besser ausgeprägt (Herz & Cupchik, 1992; Koelega & Köster, 1974).

Interessant für weitere Untersuchungen wäre, ob es Unterschiede zwischen den unterschiedlichen Geschlechtern im Hinblick auf Wahrnehmung von VR-Umgebungen bei Menschen mit allgemein höherem Gedächtnisniveau gibt.

Es gibt also Hinweise, dass die Unterschiede zwischen Männern und Frauen bei der olfaktorischen Wahrnehmung relevant sein könnten. Umso wichtiger wäre es, diese Studie mit einem geschlechtergleichverteilten Patientenkollektiv durchzuführen.

6.3 Limitationen und Herausforderungen

Auch wenn bei der Verwendung von VR-Umgebungen eine kontrollierte Umgebung mit enormer ökologischer Validität geschaffen wird, kann es bei der Verwendung von VR-Umgebungen zur „Cyber-Krankheit“ kommen. Diese äußert sich durch Kopfschmerzen, Übelkeit, Erbrechen und räumlicher Desorientiertheit. Zurückzuführen ist das Phänomen auf unterschiedliche, nicht aufeinander abgestimmte visuelle, propriozeptive, olfaktorische sowie vestibuläre Informationen, die unsere Sinneswahrnehmung inkongruent stimulieren (Mazza et al., 2021). In dieser Studie berichtete einer von 100 Proband*innen über leichte Symptome von Übelkeit und Kopfschmerzen, jedoch nicht in dem Maße, dass das Experiment unterbrochen werden musste. Somit ist in diesem Punkt von keiner Beeinflussung der Ergebnisse auszugehen.

Eine weitere Schwierigkeit ist nach wie vor die Verabreichung der olfaktorischen Reize. Hier stellt vor allem der technische Aspekt der Verabreichung eine Herausforderung dar (Kaye, 2004). Für die Verabreichung des Dufts wurden Nasenclips genutzt, welche vor dem Experiment händisch befüllt wurden. Einige der Proband*innen beschrieben insbesondere nach dem Schokoladen-Geruch auch nach Herausnahme des Clips eine bleibende olfaktorische Beeinflussung. Der Grund dafür liegt in der Natur der verwendeten Aromastoffe. Düfte sind lipophil, was zu einer starken Adhäsion der Geruchsmoleküle an der Haut zum Naseneingang führen kann. Das Haftenbleiben bzw. Vermischen von verschiedenen Aromastoffen kann wiederum die Wahrnehmung stark beeinflussen (Herz, 2021). In dieser Studie könnte das Haftenbleiben von olfaktorischen Eindrücken zu verfälschten Ergebnissen speziell der ersten Hypothese führen. Da zwischen den Wechseln der Nasenclips nur eine sehr kurze Zeitspanne war, könnte das Haftenbleiben des Schokoladen-Geruchs gerade die Bewertung von Kongruenz und Inkongruenz sowohl in der Kontrollgruppe als auch in den Versuchsgruppen beeinflusst haben und so insbesondere die Ergebnisse in Hypothese 1 beeinflusst haben. Inwieweit die Ergebnisse durch das Haftenbleiben beeinflusst wurden, kann nicht genauer gesagt werden, da keine Auswertung im Hinblick auf die Reihenfolge der verabreichten Düfte durchgeführt wurde. Interessant in diesem Zusammenhang ist jedoch, dass bei dem Sternennacht-Video, bei dem alle Proband*innen in allen Gruppen nur einen

Placebo-Clip ohne Geruch bekamen, die Intensität in der subjektiv inkongruenten Duftsituation deutlich intensiver wahrgenommen wurde. Hier kann vermutet werden, ob dies durch ein Haftenbleiben insbesondere des Schokoladengeruchs verursacht wurde.

Um solch eine Beeinflussung zu verhindern, wäre die Verwendung von Olfaktometern geeignet, bei dem alle mit Duftstoffen in Berührung kommenden Teile aus nicht haftenden Materialien (z. B. Teflon) gefertigt wären (Herz, 2021).

Außerdem gaben einige Proband*innen an, dass der Schokoladen-Geruch zunächst angenehm gewesen sei, insbesondere im Vergleich mit den anderen Düften, später jedoch unangenehm wurde. Dies könnte mit einer zu hohen Duftintensität zusammenhängen in Kombination mit dem Haftenbleiben von Duftmolekülen. Es findet sich beim Kaffeehaus in der kongruenten Duftsituation ein sehr deutliches Ergebnis, was die Intensitätswahrnehmung angeht. Unklar bleibt hierbei, ob die Kongruenz für den starken Ausschlag nach oben verantwortlich ist oder die deutlich stärkere Intensität des Duftes an sich im Vergleich zu den anderen Duftstoffen die Signifikanz ausmacht. Es empfiehlt sich, die Duftintensität im Vorhinein besser zu testen und eine ungefähr gleiche Duftintensität von allen Düften mit Ausnahme des Placebos herzustellen. Möglicherweise ist eine höhere Verdünnung geeigneter, um zu verhindern, dass Teilnehmende einen Geruch, welcher eigentlich als angenehm wahrgenommen werden sollte, nicht mehr positiv konnotiert werden kann.

Zudem kann auch die Verarbeitung der Düfte zu Schwierigkeiten führen. So kann eine längere Exposition des Duftes zu einer peripheren und zentralen Gewöhnung führen, was gleichzeitig die Empfindlichkeit gegenüber dem olfaktorischen Reiz stark herabsetzt und so die Wahrnehmung verändert (Dalton, 2000; Poellinger et al., 2001). Auch wenn die Proband*innen den olfaktorischen Reizen jeweils nur 3 Minuten ausgesetzt waren, könnte diese kurze Zeitspanne ausgereicht haben, um die Ergebnisse zu beeinflussen, insbesondere das Intensitäts-Erleben. Hier ist besonders interessant, dass die Ergebnisse der Hypothese 1 in den angenehmen Duftkonstellationen Tulpenfeld und Kaffeehaus darauf hindeuten, dass die Kongruenz zu intensiverer Duftwahrnehmung geführt hat. Dies spräche dafür, dass die inkongruente Duftsituation so verwirrend ist, dass der Körper diese Inkongruenz eher aus dem Bewussten verdrängt und so Gewöhnungseffekte schneller eintreten. Dies könnte in neuen Untersuchungen geklärt werden.

Auch kulturelle, geschlechtsspezifische, altersabhängige, aber auch biografisch bedingte Unterschiede in der Geruchswahrnehmung und Bewertung können eine Herausforderung bei der Standardisierung von Experimentalbedingungen darstellen. (Ghinea & Ademoye, 2011; Good & Kopala, 2006; Herz, 2021; Pause et al., 1996). So haben Menschen aufgrund ihrer ganz individuellen Geschichte unterschiedliche Präferenzen bzw. Aversionen sowie emotionale Assoziationen zu Gerüchen (Herz, 2021). In diesem Fall können nicht nur Gerüche

individuell unterschiedliche Bewertungen hervorrufen, sondern auch die VR-Umgebungen die Wahrnehmung verändern. So wurde das Video der Sternennacht von Vincent van Gogh als neutrales Video verwendet. Es sollte in den Teilnehmenden keine Geruchsassoziation auslösen, aber auch hier kann nicht ausgeschlossen werden, dass Proband*innen aufgrund von individuellen Erlebnissen oder Erfahrungen dieses mit einem Geruch assoziieren. Gerade für die erste Hypothese ist jedoch der individuelle Eindruck der Kongruenz bzw. Inkongruenz von entscheidender Bedeutung.

Außerdem sind Geruchsrezeptoren individuell unterschiedlich stark ausgeprägt. Diese ungleiche Ausprägung hat auch Einfluss auf die Intensität, mit der ein Geruch wahrgenommen wird und moduliert dementsprechend auch die Hedonik (Herz, 2021; Menashe et al., 2003). Es wurde durch den 3-Item-Geruchsidentifikationstest zwar bestimmt, dass alle Teilnehmenden eine normale olfaktorische Wahrnehmung hatten, jedoch wurde keine individuelle Riechtestung mit den einzelnen Proband*innen vorgenommen. Hier würde sich der SDI anbieten, um eine Übersicht über die individuelle Riechfähigkeit zu erhalten. Der SDI ist eine umfangreichere Version der 1996 von Kobal et al. entwickelten Sniffin Sticks. Er umfasst drei Testbereiche, die Riechschwellenbestimmung, die Überprüfung der Geruchsdiskrimination und die Geruchsidentifikation, welche hier in anderer Form bereits verwendetet, wurde.

6.4 Ausblick

Aus der vorliegenden Studie ergibt sich weiterer Untersuchungsbedarf.

Es konnte in vorangegangenen Studien bereits gezeigt werden, dass Kongruenz von Geruch und Umgebung zu einer positiveren Wahrnehmung führt (Baus et al., 2019; Liu et al., 2019; Micaroni et al., 2019; Niedenthal et al., 2019; Rihm et al., 2014; Seo et al., 2014; Seo & Hummel, 2011; Streeter & White, 1986). Die Ergebnisse dieser Studie widersprachen diesen Ergebnissen jedoch teilweise. So wurden nur für die angenehmen Videos Kaffeehaus und Tulpenfeld eine positivere Wahrnehmung festgestellt. Die unangenehmen Videos, Küstenexpedition und verlorene Orte hingegen wurden in der inkongruenten Duftsituation positiver wahrgenommen. Daraus ergibt sich, dass trotz vorherrschender Kongruenz die Videos mit einer negativeren Wahrnehmung einhergingen. In diesem Zusammenhang muss bedacht werden, dass die kongruente Duftsituation hier Butanol und Fischsauce, zusätzlich zu den unangenehmen Videos einen zweiten aversiven Reiz hinzugefügt hat.

Interessant für weitere Untersuchungen wäre, ob die Gefälligkeit eines olfaktorischen Stimulus einen größeren Einfluss auf die Wahrnehmung der VR-Umgebung hat als die Kongruenz.

Auch für die zweite Hypothese ergeben sich weitere Fragen, insbesondere da die Auswirkungen des Gedächtnisses auf die Wahrnehmung in VR-Umgebungen ein bisher weitgehend unerforschtes Feld ist. Dass die Wahrnehmung von VR-Umgebungen von vielfältigen Faktoren wie zum Beispiel Präsenz abhängt, konnte bereits gezeigt werden (Smith, 2019; Smith & Mulligan, 2021). Diese Studie gab Hinweise darauf, dass die Wahrnehmung der VR auch von der Gedächtnisleistung abhängt. Im Gegensatz zu den Ergebnissen der ersten Hypothese konnte hier kein Zusammenhang gefunden werden, was die unangenehme oder angenehme Video-Situation betraf. So waren Proband*innen mit hohem Erinnerungsvermögen bei dem unangenehmen Video der Küstenexpedition eher geneigt, das Video erneut zu schauen und auch bei dem unangenehmen Video der verlorenen Orte waren Teilnehmenden mit objektiv hohem Erinnerungsvermögen weniger irritiert. Das neutrale Video hingegen wurde bei hohem Erinnerungsvermögen negativer wahrgenommen. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Auswirkungen des Gedächtnisses auf die Wahrnehmung in VR-Umgebungen noch weitere Untersuchungen braucht, um vollumfänglich verstanden zu werden. Wichtig für weitere Untersuchungen wäre vorher, das Erinnerungsvermögen der Teilnehmenden objektiv zu quantifizieren. Außerdem wäre es für die Grundlagenforschung sinnvoll, die Auswirkungen des Gedächtnisses zunächst ohne zusätzliche olfaktorische Beeinflussung zu erforschen, da Gerüche deutliche Auswirkungen auf die Wahrnehmung in VR-Umgebungen haben (Rihm et al., 2014; Seo et al., 2010, 2014; Seo und Hummel, 2011).

Auch für die dritte These ergibt sich weiterer Untersuchungsbedarf, da entgegen der These keine spezifischen EEG-Veränderungen gefunden wurden.

Dass olfaktorische Stimulation Veränderungen der Hirn-Aktivität im EEG hervorrufen, ist jedoch bereits bekannt (Lorig & Schwartz, 1988; Mancini et al., 2021; Martin, 1998).

Für weitere Untersuchungen wäre interessant, ob die EEG-Aktivierungen in VR-Umgebungen durch die Hedonik des Geruchs beeinflusst werden kann und ob Kongruenz bzw. Inkongruenz hierfür eine Rolle spielt. Auch andere Elektrodenableitpositionen wären von Interesse, um das Verständnis der zentralen Duftverarbeitung in VR-Umgebungen weiter zu verbessern.

7. Zusammenfassung

Hintergrund: Wir erleben die Realität durch die Stimulation unserer fünf Sinne. In den vergangenen Jahrzehnten bekam auch die virtuelle Realität eine immer größere Bedeutung. Ob im Freizeitbereich, beim Gaming, der Industrie, aber auch beim Lernen von neuen Abläufen oder Fertigkeiten sowie im medizinischen Bereich. Um möglichst gute Effekte zu erzielen, braucht es ein realistisches Erleben und Wahrnehmen. Bisher beschränkte sich die Verbesserung der VR vor allem auf die visuelle Perzeption. Man hat jedoch verstanden, dass es für eine möglichst realistische Wahrnehmung vor allem einer multimodalen neuronalen Aktivierung bedarf, die insbesondere durch multisensorisches Erleben entsteht. Bis jetzt sind Auswirkungen auf die Wahrnehmung in VR-Umgebungen nur unvollständig verstanden.

Fragestellung: Ziel war es, herauszufinden, ob Proband*innen, welche die VR-Umgebungen subjektiv und objektiv als kongruenter wahrnehmen, sich später positiver an die Umgebung erinnern. Zudem ging die vorliegende Arbeit der Frage nach, ob Teilnehmende mit einem subjektiv erklärten und objektiv gemessenen besseren Gedächtnisleistung die VR-Umgebung positiver als Teilnehmende mit niedrigerer Gedächtnisleistung bewerteten.

Des Weiteren wurde analysiert, ob Kongruenz von olfaktorischen Reizen in VR-Umgebungen zu einer Zunahme bzw. Rechtsverschiebung der Leistungsdichtespektren in niedrigen EEG-Wellenbereichen (Delta, Theta, Alpha) führt bzw. bei Inkongruenz eher eine Abnahme bzw. Linksverschiebung der Leistungsdichte zu sehen ist.

Methoden: An der Studie nahmen 100 gesunde Proband*innen teil. Die Eignung der Teilnehmenden wurde im Vorfeld durch affektive, kognitive und psychophysikalische Tests geprüft. Das Riechvermögen wurde mittels eines Drei-Komponenten-Identifikationstest, den 'Sniffin' Sticks, beurteilt. Die Kognition wurde mithilfe des MoCAs eingeschätzt und der Affekt durch die PANAS-Skala gemessen. Alle Proband*innen nahmen an zwei Sitzungen teil. Die erste Sitzung umfasste die Präsentation fünf unterschiedlicher VR-Umgebungen durch eine VR-Brille. Die Videos waren so gewählt, dass sie olfaktorische Assoziation hervorrufen sollten. Es wurden zwei angenehme, zwei unangenehme und ein neutrales Video präsentiert. Die Experimentalgruppe umfasste 20 Teilnehmende und die Kontrollgruppe 80 Proband*innen. Die Experimentalgruppe erhielt zu den Videos kongruente Düfte, während die Kontrollgruppe inkongruente Düfte erhielt. Zur Duftpräsentation wurden Nasenclips verwendet. Gleichzeitig wurde bei allen Teilnehmenden ein 64-Kanal-EEG abgeleitet. Nach den einzelnen Videos wurden die Proband*innen zur Wahrnehmung und Erinnerungsvermögen befragt.

Um auditive Beeinflussung zu vermeiden, bekamen alle Teilnehmenden Kopfhörer mit weißem Rauschen aufgesetzt. Die zweite Sitzung fand zwei Wochen später statt und bestand in einer erneuten Befragung der Teilnehmenden zu Wahrnehmung und Erinnerung der zwei Wochen zuvor präsentierten VR-Umgebung.

Ergebnis: Zunächst fand sich, dass für alle fünf Videos mit Ausnahme der verlorenen Orte immer der objektiv kongruente Geruch auch subjektiv als am kongruentesten wahrgenommen worden ist. Bei den verlorenen Orten wurde der Kontrollclip ohne Duft am kongruentesten wahrgenommen.

Es zeigte sich, dass kongruente Bedingungen die Wahrnehmung nicht zwangsläufig immer positiv beeinflussen. Für die angenehmen Videos Kaffeehaus und Tulpenfeld konnte zwar eine positivere Wahrnehmung gemessen werden, für die unangenehmen Videos konnte dies jedoch nicht bestätigt werden. Die unangenehmen Videos, Küstenexpedition und verlorene Orte wurden in der inkongruenten Bedingung als angenehmer empfunden.

Zudem wiesen die Ergebnisse darauf hin, dass Gedächtnisleistung einen Einfluss auf die Wahrnehmung von VR-Umgebungen hat, die Effekte jedoch nicht ausschließlich positiv waren. So gaben die Teilnehmenden für das Küstenexpeditionsvideo an, dass sie eher geneigt seien, sich das Video erneut anzuschauen, wenn ein objektiv höheres Erinnerungsvermögen vorlag. Auch bei den verlorenen Orten wurde angegeben, dass das Video weniger irritierend war, wenn ein objektiv hohes Erinnerungsvermögen vorlag. Allerdings konnte beim Kaffeehaus-Video gezeigt werden, dass Proband*innen mit objektiv besserem Erinnerungsvermögen es weniger kongruent fanden. Auch bei dem Sternennacht-Video fanden die Teilnehmenden mit subjektiv hohem Erinnerungsniveau, dass das Video zwar unterhaltsamer und aufregender war, jedoch auch mit einer höheren Alarmiertheit einhergehe.

Es fand sich kein Zusammenhang zwischen Kongruenz bzw. Inkongruenz auf die Hirnfrequenzen. Im Speziellen zeigte sich weder eine Rechts- noch eine Linksverschiebung der Leistungsdichtespektren in niedrigen EEG-Wellenbereichen (Delta, Theta, Alpha), abhängig von Kongruenz oder Inkongruenz.

Ebenso ließen sich keine spezifischen Effekte zwischen einzelne Elektroden erkennen.

Schlussfolgerung: Die Annahme, dass Kongruenz bzw. Inkongruenz die Wahrnehmung von VR-Umgebungen positiv beeinflusst, bestätigte sich nicht. Sowohl positive als auch negative Effekte waren zu verzeichnen. Die Hypothese, dass ein höheres Erinnerungsvermögen zu

einer positiveren Wahrnehmung führt, konnte sich so ebenfalls nicht bestätigen. Auch hier wurden gegenteilige Ergebnisse gefunden.

Auch die dritte Hypothese, dass Kongruenz von olfaktorischen Reizen in VR-Umgebungen zu einer Zunahme bzw. Rechtsverschiebung der Leistungsdichtespektren in niedrigen EEG-Wellenbereichen führt bzw. Inkongruenz zu einer Linksverschiebung der Leistungsdichte konnte nicht bestätigt werden. Es konnten keine eindeutigen Effekte durch Kongruenz bzw. Inkongruenz auf die Hirnfrequenzen nachgewiesen werden.

Diese Untersuchung wirft weitere Fragen auf, da die Ergebnisse einzelnen vorherigen Studien widersprechen. Für ein vertieftes und besseres Verständnis von Wahrnehmung in VR-Umgebungen sind weitere, breiter aufgestellte Untersuchungen und eventuell auch andere Untersuchungs- und Messmethoden notwendig.

7. Summary

Background: We experience reality through the stimulation of our five senses. In recent decades, virtual reality has also become increasingly important. Whether in the leisure segment, gaming, or industry, but also in learning new processes or skills and in the medical field. To achieve the best possible effects, realistic experience and perception are needed. Until now, the improvement of VR has been limited, especially to visual perception. However, it has been understood that the most realistic perception possible requires, above all, multi-modal neuronal activation, which arises in particular through multi-sensory experience. So far, the effects on perception in VR environments are only partially understood.

Research question: The aim was to find out whether participants who subjectively and objectively perceived the VR environments as more congruent remembered the environment more positively. In addition, the present study addressed the question of whether participants with subjectively declared and objectively measured higher memory performance evaluated the VR environment more positively than those with lower memory performance. Furthermore, it was analyzed whether the congruence of olfactory stimuli in VR environments leads to an increase or a rightward shift of the power density spectra in low EEG wavebands (delta, theta and alpha) or whether incongruence leads to a decrease or leftward shift of the power density.

Methods: 100 healthy volunteers took part in the study. The participants' eligibility was tested in advance using affective, cognitive, and psycho-physical tests. Olfactory ability was assessed using a three-component identification test, the Sniffin' Sticks. Cognitive performance was investigated via the Montreal-Cognitive-Assessment and affective state was measured using the Positive and Negative Affect Schedule. All participants were enrolled in two sessions. The first session involved the presentation of five different VR environments through VR glasses. The videos had been chosen to evoke various olfactory associations. As a result, two pleasant, two unpleasant, and one neutral video were presented. The experimental group consisted of 20 participants, and the control group consisted of 80 participants. The experimental group received congruent scents to the videos, while the control group received scents that were incongruent to the videos. Nose clips were used to present the odor. At the same time, a 64-channel EEG was derived from all participants. After the individual videos, the participants were asked about their perception and memory. In order to avoid auditory interference, all participants were equipped with white-noise headphones. The

second session took place two weeks later and consisted of asking the participants again about their perception and memory of the VR environment presented two weeks earlier.

Result: First, it was found that for all five videos, except for the lost places video, the objectively congruent smell was also subjectively perceived as the most congruent. For the lost places video, the unscented control clip was perceived as the most congruent. Furthermore, it was shown that congruent conditions do not necessarily always have a positive effect on perception. For the pleasant videos, coffee house, and tulip field, a more positive perception was found in cases of congruent conditions, but this effect was not found in cases of the unpleasant videos. The unpleasant videos, coastal expedition, and lost places were perceived as more pleasant in the incongruent condition.

Additionally, the present results indicated that memory performance influences the perception of VR environments, but the effects were not exclusively positive. For example, for the coastal expedition video, participants indicated that they were more inclined to watch the video again if their level of memory was actually higher. Also, in case of the lost places video, it was stated that the video was less irritating when the level of memory was actually high. However, for the coffee house video, it could be shown that subjects with actually better memory found it less congruent. Also, with the Starry Night video, participants with self-reported high memory levels rated the video as more entertaining and exciting, but it was also associated with a higher level of alarm.

No correlation was found between congruence and incongruence of olfactory and visual stimuli in brain frequencies. There was neither a rightward nor a leftward shift of the power density spectra in low EEG wavebands (delta, theta, and alpha), depending on congruence or incongruence. Likewise, no specific effects between individual electrodes were identified.

Conclusion: The assumption that congruence or incongruence positively influences the perception of VR environments was not confirmed. Instead, present results indicate an ambiguous impact of congruent vs. incongruent conditions on the perception of VR environments. The hypothesis that a higher memory capacity leads to a more positive perception could not be confirmed either. Also, here, contrary results were found. Moreover, the third hypothesis, that congruence of olfactory stimuli in VR environments leads to an increase or rightward shift of the power density spectra in low EEG wavebands, or that in-congruence leads to a leftward shift of the power density, was not confirmed, as no clear effects of congruence or incongruence on brain frequencies were found.

The present study raises further questions because its results contradict some previous studies. For a more profound understanding of perception in VR environments, further broadly - based studies involving various measurements are needed.

8. Literaturverzeichnis

- Archer, N. S., Bluff, A., Eddy, A., Nikhil, C. K., Hazell, N., Frank, D., & Johnston, A. (2022). Odour enhances the sense of presence in a virtual reality environment. *PLOS ONE*, *17*(3), e0265039. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0265039>
- Aricò, P., Borghini, G., Di Flumeri, G., Sciaraffa, N., & Babiloni, F. (2018). Passive BCI beyond the lab: Current trends and future directions. *Physiological Measurement*, *39*(8), 08TR02. <https://doi.org/10.1088/1361-6579/aad57e>
- Auvray, M., & Spence, C. (2008). The multisensory perception of flavor. *Consciousness and cognition*, *17*(3), 1016–1031. <https://doi.org/10.1016/j.concog.2007.06.005>
- Baus, O., & Bouchard, S. (2017). Exposure to an unpleasant odour increases the sense of Presence in virtual reality. *Virtual Reality*, *21*, 59-71. <https://doi.org/10.1007/s10055-016-0299-3>
- Baus, O., Bouchard, S., & Nolet, K. (2019). Exposure to a pleasant odour may increase the sense of reality, but not the sense of presence or realism. *Behaviour & Information Technology*, *38*(12), 1369–1378. <https://doi.org/10.1080/0144929X.2019.1590458>
- Berger, H. (1929). Über das Elektrenkephalogramm des Menschen. *Archiv für Psychiatrie und Nervenkrankheiten*, *87*(1), 527–570. <https://doi.org/10.1007/BF01797193>
- Brand, G., & Millot, J. L. (2001). Sex differences in human olfaction: Between evidence and enigma. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology. B, Comparative and Physiological Psychology*, *54*(3), 259–270. <https://doi.org/10.1080/02724990143000045>
- Bühler, S. (2013). Montreal-Cognitive Assessment (MoCA) – In 20 Minuten zum Ergebnis. *ergopraxis*, *6*(03), 26–27. <https://doi.org/10.1055/s-0033-1338276>
- Cabanac, M. (2002). What is emotion? *Behavioural Processes*, *60*(2), 69–83. [https://doi.org/10.1016/s0376-6357\(02\)00078-5](https://doi.org/10.1016/s0376-6357(02)00078-5)

- Cahill, L., Babinsky, R., Markowitsch, H. J., & McGaugh, J. L. (1995). The amygdala and emotional memory. *Nature*, *377*(6547), 295–296. <https://doi.org/10.1038/377295a0>
- Canli, T., Zhao, Z., Brewer, J., Gabrieli, J. D., & Cahill, L. (2000). Event-related activation in the human amygdala associates with later memory for individual emotional experience. *The Journal of Neuroscience: The Official Journal of the Society for Neuroscience*, *20*(19), RC99. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.20-19-j0004.2000>
- Chapuis, J., Cohen, Y., He, X., Zhang, Z., Jin, S., Xu, F., & Wilson, D. A. (2013). Lateral entorhinal modulation of piriform cortical activity and fine odor discrimination. *The Journal of Neuroscience: The Official Journal of the Society for Neuroscience*, *33*(33), 13449–13459. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.1387-13.2013>
- Chen, Y. (2006). Olfactory Display: Development and Application in Virtual Reality Therapy. *16th International Conference on Artificial Reality and Telexistence—Workshops (ICAT'06)*, 580–584. <https://doi.org/10.1109/ICAT.2006.95>
- Curtis, M. A., Kam, M., Nannmark, U., Anderson, M. F., Axell, M. Z., Wikkelso, C., Holtås, S., van Roon-Mom, W. M. C., Björk-Eriksson, T., Nordborg, C., Frisé, J., Dragunow, M., Faull, R. L. M., & Eriksson, P. S. (2007). Human neuroblasts migrate to the olfactory bulb via a lateral ventricular extension. *Science (New York, N.Y.)*, *315*(5816), 1243–1249. <https://doi.org/10.1126/science.1136281>
- Dalton, P. (2000). Psychophysical and Behavioral Characteristics of Olfactory Adaptation. *Chemical Senses*, *25*(4), 487–492. <https://doi.org/10.1093/chemse/25.4.487>
- Dalton, P., Doolittle, N., & Breslin, P. A. S. (2002). Gender-specific induction of enhanced sensitivity to odors. *Nature Neuroscience*, *5*(3), 199–200. <https://doi.org/10.1038/nn803>
- Davidson, Richard J., Daren C. Jackson, und Christine L. Larson. 2000. „Human electroencephalography“. In J. T. Cacioppo, L.G. Tassinary & G. Berntson (Hrsg), *Handbook of psychophysiology*, 2nd ed. S. 27–52 New York, NY, US: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781107415782>

- Demattè, M. L., Österbauer, R., & Spence, C. (2007). Olfactory cues modulate facial attractiveness. *Chemical Senses*, 32(6), 603–610.
<https://doi.org/10.1093/chemse/bjm030>
- Di Flumeri, G., Herrero, M., Trettel, A., Cherubino, P., Maglione, Colosimo, A., Moneta, E., Peparaiò, M., & Babiloni, F. (2016). *EEG Frontal Asymmetry Related to Pleasantness of Olfactory Stimuli in Young Subjects*. , Nermend, K., Latuszynka, M. (Hrsg), Selected Issues in Experimental Economics: Proceedings in the 2015 Computational Methods in Experimental Economics (CMEE) Conference, (373-381). Springer.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-28419-4_23
- Dinh, H. Q., Walker, N., Hodges, L. F., Song, C., & Kobayashi, A. (1999). Evaluating the importance of multi-sensory input on memory and the sense of presence in virtual environments. *Proceedings IEEE Virtual Reality (Cat. No. 99CB36316)*, 222–228.
<https://doi.org/10.1109/VR.1999.756955>
- Doty, R. L. (2012). Olfaction in Parkinson's disease and related disorders. *Neurobiology of Disease*, 46(3), 527–552. <https://doi.org/10.1016/j.nbd.2011.10.026>
- Ebner, A., Deuschl, G., Diener, H.-C., Deuschl, G., Hopf, H. C., Reichmann, H., Bast, T., Baumgartner, C., Besser, R., Deuschl, G., Ebner, A., Faust, V., Fröscher, W., Gallmetzer, P., Hagemann, G., Hamer, H. M., Haueisen, J., Hinrichs, H., Hoppe, M., ... Zeitlhofer, J. (2011). *EEG* (2., aktualisierte und erweiterte Auflage). Thieme Verlag.
<https://doi.org/10.1055/b-002-37738>
- Engelmann, N. (2018). *Virtual Reality Gaming: Potential der Technologie für die Welt der digitalen Spiele*. Tectum Verlag. ISBN : 978-3-8288-4130-7
- Ergorul, C., & Eichenbaum, H. (2004). The hippocampus and memory for „what,“ „where,“ and „when“. *Learning & Memory (Cold Spring Harbor, N.Y.)*, 11(4), 397–405.
<https://doi.org/10.1101/lm.73304>

- Fahr, A., & Hofer, M. (2013). *Psychophysiologische Messmethoden*. Möhring, W, Schlütz, D. (Hrsg). *Handbuch standardisierte Erhebungsverfahren in der Kommunikationswissenschaft*. (S. 347–366). Springer https://doi.org/10.1007/978-3-531-18776-1_19
- Flavián, C, Ibáñez-Sánchez, S., & Orús, C. (2021). The influence of scent on virtual reality experiences: The role of aroma-content congruence. *Journal of Business Research*, 123, 289–301. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2020.09.036>
- Freiherr, J., Wiesmann, M., Witt, M. (2014). Functional Anatomy of the Olfactory System II: Central Relays, Pathways, and their Function. Welge-Luessen, A (Hrsg) In *Management of Smell and Taste Disorders* (2014. Aufl.). (27-35) Thieme Verlag. <https://doi.org/10.1055/b-0034-91130>
- Freiherr, J., & Wiesmann, M. (2006). Das olfaktorische System des Menschen. *Der Nervenarzt*, 77, 931–939. <https://doi.org/10.1007/s00115-006-2121-z>
- Gallace, A., Ngo, M. K., Sulaitis, J., & Spence, C. (2012). *Multisensory Presence in Virtual Reality: Possibilities & Limitations*. Ghinea, G. Andres, F. Gulliver, S.R. (Hrsg) Multiple Sensorial Media Advances and Applications: New Developments in MulSeMedia; IGI Global. <https://doi.org/10.4018/978-1-60960-821-7.ch001>
- Ghinea, G., & Ademoye, O. A. (2011). Olfaction-enhanced multimedia: Perspectives and challenges. *Multimedia Tools and Applications*, 55(3), 601–626. <https://doi.org/10.1007/s11042-010-0581-4>
- Good, K. P., & Kopala, L. (2006). Sex Differences and Olfactory Function. In C. Pantelis, D. Castle, & W. J. Brewer (Hrsg.), *Olfaction and the Brain* (S. 183–202). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511543623.012>
- Gottfried, J. A., & Dolan, R. J. (2003). The nose smells what the eye sees: Crossmodal visual facilitation of human olfactory perception. *Neuron*, 39(2), 375–386. [https://doi.org/10.1016/s0896-6273\(03\)00392-1](https://doi.org/10.1016/s0896-6273(03)00392-1)

- Harman, J., Brown, R., & Johnson, D. (2017). Improved Memory Elicitation in Virtual Reality: New Experimental Results and Insights. In R. Bernhaupt, G. Dalvi, A. Joshi, D. K. Balkrishan, J. O'Neill, & M. Winckler (Hrsg.), *Human-Computer Interaction—INTERACT 2017* (Bd. 10514, S. 128–146). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-67684-5_9
- Herrera, G., Jordan, R., & Vera, L. (2006). Agency and Presence: A Common Dependence on Subjectivity? *Presence*, *15*, 539–552. <https://doi.org/10.1162/pres.15.5.539>
- Herrmann, A., Zidansek, M., Sprott, D. E., & Spangenberg, E. R. (2013). The power of simplicity: Processing fluency and the effects of olfactory cues on retail sales. *Journal of Retailing*, *89*(1), 30–43. <https://doi.org/10.1016/j.jretai.2012.08.002>
- Herz, R. (2021). Olfactory Virtual Reality: A New Frontier in the Treatment and Prevention of Posttraumatic Stress Disorder. *Brain Sciences*, *11*(8), 1070. <https://doi.org/10.3390/brainsci11081070>
- Herz, R., & Cupchik, G. (1992). An experimental characterization of odor-evoked memories in humans. *Chemical Senses*, *17*(5) <https://doi.org/10.1093/chemse/17.5.519>
- Herz, R., & Cupchik, G. (1995). The Emotional Distinctiveness of Odor-evoked Memories. *Chemical senses*, *20*, 517–528. <https://doi.org/10.1093/chemse/20.5.517>
- Herz, R., & Engen, T. (1996). Odor memory: Review and analysis. *Psychonomic bulletin & review*, *3*, 300–313. <https://doi.org/10.3758/BF03210754>
- Herz, R. S., Eliassen, J., Beland, S., & Souza, T. (2004). Neuroimaging evidence for the emotional potency of odor-evoked memory. *Neuropsychologia*, *42*(3), 371–378. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2003.08.009>
- Herz, R. S., & Schooler, J. W. (2002). A Naturalistic Study of Autobiographical Memories Evoked by Olfactory and Visual Cues: Testing the Proustian Hypothesis. *The American Journal of Psychology*, *115*(1), 21–32. <https://doi.org/10.2307/1423672>

- Hornung, D. E., & Leopold, D. A. (1999). Relationship Between Uninasal Anatomy and Uninasal Olfactory Ability. *Archives of Otolaryngology–Head & Neck Surgery*, 125(1), 53–58. <https://doi.org/10.1001/archotol.125.1.53>
- Hruby, F. (2019). *The Sound of Being There: Audiovisual Cartography with Immersive Virtual Environments*. KN- Journal of Cartography and Geographic Information. Volume 69, 19–28. <https://doi.org.10.1007./s42489-019-00003-5>
- Hummel, T., Kobal, G., Gudziol, H., & Mackay-Sim, A. (2007). Normative data for the “Sniffin’ Sticks” including tests of odor identification, odor discrimination, and olfactory thresholds: An upgrade based on a group of more than 3,000 subjects. *European Archives of Oto-Rhino-Laryngology*, 264(3), 237–243. <https://doi.org/10.1007/s00405-006-0173-0>
- Hummel, T., Welge-Lüssen, A., Czesnik, D., Just, T., Damm, M., Landis, B. N., Gudziol, H., Manzini, I., Hähner, A., Muttray, A., Hansen, A., Stuck, B., Heckmann, J. G., Welge-Lüssen, A., Hüttenbrink, K.-B., Witt, M., & Hummel, T. (2009). *Riech- und Schmeckstörungen*. Thieme Verlag. <https://doi.org/10.1055/b-002-33686>
- Huppelsberg, & Walter. (2005). *Kurzlehrbuch Physiologie*. Thieme; 2., Aufl. Edition (13. Juli 2005). <https://doi.org.10.1055/b-002-25599>
- Jiang, H., Schuele, S., Rosenow, J., Zelano, C., Parvizi, J., Tao, J. X., Wu, S., & Gottfried, J. A. (2017). Theta Oscillations Rapidly Convey Odor-Specific Content in Human Piriform Cortex. *Neuron*, 94(1), 207-219.e4. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2017.03.021>
- Kang, M.-S., Hong, S. W., Blake, R., & Woodman, G. F. (2011). Visual working memory contaminates perception. *Psychonomic Bulletin & Review*, 18(5), 860–869. <https://doi.org/10.3758/s13423-011-0126-5>
- Kaye, J. „Jofish“. (2004). Making Scents: Aromatic output for HCI. *Interactions*, 11(1), 48–61. <https://doi.org/10.1145/962342.964333>

- Kim, S. M. Park, S. Hong, J W. Jang, E. J. Pak, C.H. (2016). *Psychophysiological effects of orchid and rose fragrances on humans*. *Horticultural Science and Technology* 34(3), 472-487. <https://doi.org/10.12972/kjhst.20160048>
- Kjelvik, G., Evensmoen, H. R., Brezova, V., & Håberg, A. K. (2012). The human brain representation of odor identification. *Journal of Neurophysiology*, 108(2), 645–657. <https://doi.org/10.1152/jn.01036.2010>
- Klemm, W. R., Lutes, S. ., Hendrix, D. V., & Warrenburg, S. (1992). Topographical EEG maps of human responses to odors. *Chemical Senses*, 17(3), 347–361. <https://doi.org/10.1093/chemse/17.3.347>
- Koelega, H. S., & Köster, E. P. (1974). Some experiments on sex differences in odor perception. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 237(0), 234–246. <https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.1974.tb49859.x>
- Krohne, H. W., Egloff, B., Kohlmann, C.-W., & Tausch, A. (1996). Untersuchungen mit einer deutschen Version der „Positive and Negative Affect Schedule“ (PANAS). [Investigations with a German version of the Positive and Negative Affect Schedule (PANAS)]. *Diagnostica*, 42(2), 139–156. <https://doi.org/10.1037/t49650-000>
- Kvavilashvili, L., & Ellis, J. (2004). Ecological validity and the real-life/laboratory controversy in memory research: A critical and historical review. *History and Philosophy of Psychology*, 6. 59-80. ISSN: 1469-283X
- Liu, R., Hannum, M., & Simons, C. T. (2019). Using immersive technologies to explore the effects of congruent and incongruent contextual cues on context recall, product evaluation time, and preference and liking during consumer hedonic testing. *Food Research International (Ottawa, Ont.)*, 117, 19–29. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.04.024>
- Locke, B., & Grimm, C. H. (1949). Odor selection, preferences and identification. *The Journal of applied psychology*. 33(2). 167-174. <https://doi.org/10.1037/H0062514>

- Lombard, Ditton. (1997). At the Heart of It All: The Concept of Presence. *Journal of Computer-Mediated Communication*, 3(2). <https://doi.org/10.1111/j.1083-6101.1997.tb00072.x>
- Lorig, T. S., Huffman, E., DeMartino, A., & DeMarco, J. (1991). The effects of low concentration odors on EEG activity and behavior. *Journal of Psychophysiology*, 5(1), 69–77.
- Lorig, T. S., & Schwartz, G. E. (1988). Brain and odor: I. Alteration of human EEG by odor administration. *Psychobiology*, 16(3), 281–284. <https://doi.org/10.3758/BF03327318>
- Lüllmann-Rauch, R., Asan, E. (2003). *Taschenlehrbuch Histologie 6 Aufl. Thieme*. <https://doi.org/10.1055/b-006-163361>
- Lundström et al. (2010). *Central Processing of the Chemical Senses: An Overview*. *ACS-Chemical Neuroscience*, 2(1). 5-16. <https://doi.org/10.1021/cn1000843>
- Mancini, M., Cherubino, P., Cartocci, G., Martinez, A., Borghini, G., Guastamacchia, E., Di Flumeri, G., Rossi, D., Modica, E., Menicocci, S., Lupo, V., Trettel, A., & Babiloni, F. (2021). Forefront Users' Experience Evaluation by Employing Together Virtual Reality and Electroencephalography: A Case Study on Cognitive Effects of Scents. *Brain Sciences*, 11(2), 256. <https://doi.org/10.3390/brainsci11020256>
- Maresh, A., Gil, D. R., Whitman, M. C., & Greer, C. A. (2008). Principles of Glomerular Organization in the Human Olfactory Bulb – Implications for Odor Processing. *PLOS ONE*, 3(7), e2640. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0002640>
- Marin, C., Vilas, D., Langdon, C., Alobid, I., López-Chacón, M., Haehner, A., Hummel, T., & Mullol, J. (2018). Olfactory Dysfunction in Neurodegenerative Diseases. *Current Allergy and Asthma Reports*, 18(8), 42. <https://doi.org/10.1007/s11882-018-0796-4>
- Martin, G. N. (1998). Human electroencephalographic (EEG) response to olfactory stimulation: Two experiments using the aroma of food. *International Journal of Psychophysiology*, 30(3), 287–302. [https://doi.org/10.1016/S0167-8760\(98\)00025-7](https://doi.org/10.1016/S0167-8760(98)00025-7)
- Mazza, M., Kammler-Sücker, K., Leménager, T., Kiefer, F., & Lenz, B. (2021). Virtual reality: A powerful technology to provide novel insight into treatment mechanisms of addiction. *Translational Psychiatry*, 11(1). <https://doi.org/10.1038/s41398-021-01739-3>

- McAnally, K., & Wallis, G. (2022). Visual-haptic integration, action and embodiment in virtual reality. *Psychological Research*, 86(6), 1847–1857. <https://doi.org/10.1007/s00426-021-01613-3>
- Menashe, I., Man, O., Lancet, D., & Gilad, Y. (2003). Different noses for different people. *Nature Genetics*, 34(2), 143–144. <https://doi.org/10.1038/ng1160>
- Micaroni, L., Carulli, M., Ferrise, F., Gallace, A., & Bordegoni, M. (2019). An Olfactory Display to Study the Integration of Vision and Olfaction in a Virtual Reality Environment. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 19(3). JCISE-18-1263 <https://doi.org/10.1115/1.4043068>
- Moncreiff, R. W. (1962). *Perfumery and Essential Oil Record*. 53 (S. 757–760)
- Moore, A. G., Herrera, N. S., Hurst, T. C., McMahan, R. P., & Poeschl, S. (2015). The effects of olfaction on training transfer for an assembly task. *2015 IEEE Virtual Reality (VR)*, 237–238. <https://doi.org/10.1109/VR.2015.7223383>
- Müller, A., Landis, B. N., Zahnert, T., Reichmann, H., & Hummel, T. (2005). Riechen: Normale Funktion und Störungen. *Aktuelle Neurologie*, 32(1), 15–27. <https://doi.org/10.1055/s-2004-834578>
- Nasreddine, Z. S., Phillips, N. A., Bédirian, V., Charbonneau, S., Whitehead, V., Collin, I., Cummings, J. L., & Chertkow, H. (2005). The Montreal Cognitive Assessment, MoCA: A brief screening tool for mild cognitive impairment. *Journal of the American Geriatrics Society*, 53(4), 695–699. <https://doi.org/10.1111/j.1532-5415.2005.53221.x>
- Niedenthal, S., Lundén, P., Ehrndal, M., & Olofsson, J. K. (2019). A Handheld Olfactory Display For Smell-Enabled VR Games. *2019 IEEE International Symposium on Olfaction and Electronic Nose (ISOEN)*. <https://doi.org/10.1109/ISOEN.2019.8823162>
- Pan, Y., Zuo, W., & Yi, X. (2013). The influence of visual short-term memory on size perception. *Visual Cognition*, 21(6), 789–802. <https://doi.org/10.1080/13506285.2013.832448>

- Patin, A., & Pause, B. M. (2015). Human amygdala activations during nasal chemoreception. *Neuropsychologia*, *78*, 171–194. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2015.10.009>
- Pause, B. M., Sojka, B., Krauel, K., Fehm-Wolfsdorf, G., & Ferstl, R. (1996). Olfactory information processing during the course of the menstrual cycle. *Biological Psychology*, *44*(1), 31–54. [https://doi.org/10.1016/S0301-0511\(96\)05207-6](https://doi.org/10.1016/S0301-0511(96)05207-6)
- Perl, O., Arzi, A., Sela, L., Secundo, L., Holtzman, Y., Samnon, P., Oksenberg, A., Sobel, N., & Hairston, I. S. (2016). Odors enhance slow-wave activity in non-rapid eye movement sleep. *Journal of Neurophysiology*, *115*(5), 2294–2302. <https://doi.org/10.1152/jn.01001.2015>
- Poellinger, A., Thomas, R., Lio, P., Lee, A., Makris, N., Rosen, B. R., & Kwong, K. K. (2001). Activation and habituation in olfaction—An fMRI study. *NeuroImage*, *13*(4), 547–560. <https://doi.org/10.1006/nimg.2000.0713>
- Rauchs, G., Orban, P., Balteau, E., Schmidt, C., Degueldre, C., Luxen, A., Maquet, P., & Peigneux, P. (2008). Partially segregated neural networks for spatial and contextual memory in virtual navigation. *Hippocampus*, *18*(5), 503. <https://doi.org/10.1002/hipo.20411>
- Rihm, J. S., Diekelmann, S., Born, J., & Rasch, B. (2014). Reactivating memories during sleep by odors: Odor specificity and associated changes in sleep oscillations. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *26*(8), 1806–1818. https://doi.org/10.1162/jocn_a_00579
- Risso, P., Covarrubias Rodriguez, M., Bordegoni, M., & Gallace, A. (2018). Development and Testing of a Small-Size Olfactometer for the Perception of Food and Beverages in Humans. *Frontiers in Digital Humanities*, *5*. <https://doi.org/10.3389/fdigh.2018.00007>

- Riva, G., Mantovani, F., Capideville, C., Preziosa, A., Morganti, F., Villani, D., Gaggioli, A., Botella, C., & Alcañiz Raya, M. (2007). Affective Interactions Using Virtual Reality: The Link between Presence and Emotions. *Cyberpsychology & behavior : the impact of the Internet, multimedia and virtual reality on behavior and society*, 10, 45–56. <https://doi.org/10.1089/cpb.2006.9993>
- Riva, G. Waterworth, J. A. (2003). *Presence and the Self: A cognitive neuroscience approach*. *Presence- Connect*, 3(3). <https://www8.informatik.umu.se/~jwworth/Riva-Waterworth.htm>
- Rizzo, A. 'Skip', & Shilling, R. (2017). Clinical Virtual Reality tools to advance the prevention, assessment, and treatment of PTSD. *European Journal of Psychotraumatology*, 8(sup5), 1414560. <https://doi.org/10.1080/20008198.2017.1414560>
- Rolls, E. T., Kringelbach, M. L., & de Araujo, I. E. T. (2003). Different representations of pleasant and unpleasant odours in the human brain. *The European Journal of Neuroscience*, 18(3), 695–703. <https://doi.org/10.1046/j.1460-9568.2003.02779.x>
- Sabiniewicz, A. Bunzenthal, W. Cagdas, G. Behl, O. Krasteva, N. Nelles, G. Hummel. T. (2023). *Odors in a visual virtual Environment. Effects of congruency. Behaviour & Information Technology*. <https://doi.org/10.1080/0144929X.2023.2235017>
- Sabri, M., Radnovich, A., Li, T., & Kareken, D. (2005). Neural correlates of olfactory change detection. *NeuroImage*, 25, 969–974. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2004.12.033>
- Schneider, D. W. (2020). Alertness and cognitive control: Interactions in the spatial Stroop task. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 82(5), 2257–2270. <https://doi.org/10.3758/s13414-020-01993-5>
- Schöne, B., Wessels, M., & Gruber, T. (2019). Experiences in Virtual Reality: A Window to Autobiographical Memory. *Current Psychology*, 106, 1–5. <https://doi.org/10.1007/s12144-017-9648-y>

- Schwerdtfeger, W. K., Buhl, E. H., & Germroth, P. (1990). Disynaptic olfactory input to the hippocampus mediated by stellate cells in the entorhinal cortex. *The Journal of Comparative Neurology*, 292(2), 163–177. <https://doi.org/10.1002/cne.902920202>
- Seo, H.-S., & Hummel, T. (2011). Auditory-olfactory integration: Congruent or pleasant sounds amplify odor pleasantness. *Chemical Senses*, 36(3), 301–309. <https://doi.org/10.1093/chemse/bjq129>
- Seo, H.-S., Lohse, F., Lockett, C. R., & Hummel, T. (2014). Congruent sound can modulate odor pleasantness. *Chemical Senses*, 39(3), 215–228. <https://doi.org/10.1093/chemse/bjt070>
- Seo, H.-S., Roidl, E., Müller, F., & Negoias, S. (2010). Odors enhance visual attention to congruent objects. *Appetite*, 54(3), 544–549. <https://doi.org/10.1016/j.appet.2010.02.011>
- Slater, Wilbur. (1997). *A Framework for Immersive Virtual Environments (FIVE): Speculations on the Role of Presence in Virtual Environments*. Presence: Teleoperators & Virtual Environment, 6(6), 603-616. <https://doi.org/10.1162/pres.1997.6.6.603>
- Smith, S. A. (2019). Virtual reality in episodic memory research: A review. *Psychonomic Bulletin & Review*, 26(4), 1213–1237. <https://doi.org/10.3758/s13423-019-01605-w>
- Smith, S. A., & Mulligan, N. W. (2021). Immersion, presence, and episodic memory in virtual reality environments. *Memory (Hove, England)*, 29(8), 983–1005. <https://doi.org/10.1080/09658211.2021.1953535>
- Spagnolli, A., & Gamberini, L. (2005). A Place for Presence. Understanding the Human Involvement in Mediated Interactive Environments. *PsychNology Journal*, 3, 6–15.
- Spangenberg, E. R., Grohmann, B., & Sprott, D. E. (2005). It's beginning to smell (and sound) a lot like Christmas: The interactive effects of ambient scent and music in a retail setting. *Journal of Business Research*, 58(11), 1583–1589. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2004.09.005>

- Staubli, U., Fraser, D., Kessler, M., & Lynch, G. (1986). Studies on retrograde and anterograde amnesia of olfactory memory after denervation of the hippocampus by entorhinal cortex lesions. *Behavioral and Neural Biology*, 46(3), 432–444. [https://doi.org/10.1016/S0163-1047\(86\)90464-4](https://doi.org/10.1016/S0163-1047(86)90464-4)
- Streeter, N., & White, T. (1986). Incongruent Contextual Information Intrudes on Short-term Olfactory Memory. *Chemosensory Perception*, 4, 1–8. <https://doi.org/10.1007/s12078-010-9082-0>
- Sullivan, R. M., Wilson, D. A., Ravel, N., & Mouly, A.-M. (2015). Olfactory memory networks: From emotional learning to social behaviors. *Frontiers in Behavioral Neuroscience*, 9, 36. <https://doi.org/10.3389/fnbeh.2015.00036>
- Tauscher, J.-P., Schottky, F. W., Grogorick, S., Bittner, P. M., Mustafa, M., & Magnor, M. (2019). Immersive EEG: Evaluating Electroencephalography in Virtual Reality. *2019 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*, 1794–1800. <https://doi.org/10.1109/VR.2019.8797858>
- Toffolo, M. B. J., Smeets, M. A. M., & van den Hout, M. A. (2012). Proust revisited: Odours as triggers of aversive memories. *Cognition & Emotion*, 26(1), 83–92. <https://doi.org/10.1080/02699931.2011.555475>
- Tortell, R., Luigi, D. P., Dozois, A., Bouchard, S., Morie, J. F., & Ilan, D. (2007). The effects of scent and game play experience on memory of a virtual environment. *Virtual Reality*, 11(1), 61–68. <https://doi.org/10.1007/s10055-006-0056-0>
- Van Wegen, M., Herder, J. L., Adelsberger, R., Pastore-Wapp, M., van Wegen, E. E. H., Bohlhalter, S., Nef, T., Krack, P., & Vanbellingen, T. (2023). An Overview of Wearable Haptic Technologies and Their Performance in Virtual Object Exploration. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 23(3), 1563. <https://doi.org/10.3390/s23031563>
- Walter, W. G., & Dovey, V. J. (1944). ELECTRO-ENCEPHALOGRAPHY IN CASES OF SUB-CORTICAL TUMOUR. *Journal of Neurology, Neurosurgery, and Psychiatry*, 7(3–4), 57–65. <https://doi.org/10.1136/jnnp.7.3-4.57>

- Watson, D., Clark, L. A., & Tellegen, A. (1988). Development and validation of brief measures of positive and negative affect: The PANAS scales. *Journal of Personality and Social Psychology*, 54(6), 1063–1070. <https://doi.org/10.1037/0022-3514.54.6.1063>
- Willander, J., & Larsson, M. (2006). Smell your way back to childhood: Autobiographical odor memory. *Psychonomic Bulletin & Review*, 13(2), 240–244. <https://doi.org/10.3758/bf03193837>
- Witte, O. W., Hagemann, G., & Haueisen, J. (2006). (o. J.). *Physiologische Grundlagen des EEG*. A. Ebner & G. Deuschl (Hrsg.), EEG, 2, (1-9). Georg Thieme Verlag. <https://doi.org/10.1055/b-002-37738>
- Yingling, Pfurtscheller, Buser, Lopez da Silva . Petsche. (1980). *Rhythmic EEG Activities and Cortical Functioning*. *Biological Psychology*, 14,(1-2), 141-143. [https://doi.org/10.1016/0301-0511\(82\)90022-9](https://doi.org/10.1016/0301-0511(82)90022-9)
- Zschoke, S. Hansen, H. C. 2023. *Klinische Elektroenzephalographie Zschocke, S. & Hansen, H. C. (Hrsg). (4). Springer.*

9. Anhang

Ergebnisse der Kovarianzanalyse für die einzelnen Videos:

Tulpenfeld (siehe Tabelle 8)

Verlorene Orte (siehe Tabelle 9)

Kaffeehaus (siehe Tabelle 10)

Küstenexpedition (siehe Tabelle 11)

Die Sternennacht (siehe Tabelle 12)

Tabelle 8	TULPENFELD	objektiv kongruente vs. inkongruente Bedingung	subjektiv kongruente vs. inkongruente Bedingung	subjektiv erklärtes Erinnerungsvermögen
Gefälligkeit	F	3.287	10.28	1.981
	p	0.073	0.002	0.163
Intensität	F	06.08	0.714	0.33
	p	0.016	0.4	0.567
Vertrautheit	F	0.481	0.562	1.222
	p	0.49	0.455	0.272
Kongruenz	F	8.317	339.419	1.353
	p	0.005	< .001	0.248
Unterhaltsamkeit	F	0.085	1.7	0.322
	p	0.772	0.196	0.572
Traurigkeit	F	0.013	1.254	3.417
	p	0.909	0.266	0.068
Aufgeregtheit	F	1.064	2.67	0.113
	p	0.305	0.106	0.738
Irritation	F	0.23	0.832	0.066
	p	0.633	0.364	0.798
Alarmiertheit	F	0.313	2.028	3.043
	p	0.577	0.158	0.085
Bereitschaft VR erneut zu sehen	F	0.579	0.333	1.983
	p	0.449	0.565	0.163
Videolänge	F	0.294	1.918	0.105
	p	0.589	0.169	0.746
	F	0.214	1.794	142.48
	p	0.645	0.184	< .001

Die Freiheitsgrade für das Tulpenvideo entsprechen in allen Spalten 1. Für den Restwert ergibt sich 90.

Tabelle 9	verlorene Orte	objektiv kongruente vs. inkongruente Bedingung	Objektives Erinnerungsvermögen	subjektiv kongruente vs. inkongruente Bedingung	subjektiv
					erklärtes Erinnerungsvermögen
Gefälligkeit	F	4.206	0.085	4.111	0.124
	p	0.043	0.771	0.046	0.725
Intensität	F	0.02	0.795	1.639	0.607
	p	0.888	0.375	0.204	0.438
Vertrautheit	F	17.223	0.048	1.528	0.066
	p	< .001	0.828	0.22	0.798
Kongruenz	F	0.523	6.093	332.485	0.044
	p	0.472	0.016	< .001	0.834
Unterhaltsamkeit	F	0.026	3.81	0.012	2.51
	p	0.872	0.054	0.915	0.117
Traurigkeit	F	0.517	6.379	4.261	0.01
	p	0.474	0.013	0.042	0.92
Aufgeregtheit	F	0.847	0.356	2.694	2.622
	p	0.36	0.552	0.104	0.109
Irritation	F	0.003	9.067	0.9	0.219
	p	0.954	0.003	0.345	0.641
Alarmiertheit	F	0.61	3.532	0.07	3.021
	p	0.437	0.063	0.792	0.086
Bereitschaft VR erneut zu sehen	F	0.021	1.152	0.002	0.257
	p	0.886	0.286	0.968	0.614
Videolänge	F	1.959	0.022	1.801	0.206
	p	0.165	0.882	0.183	0.651
Bewertung des Erinnerungsvermögens	F	1.802	8.262e -6	2.199	165.072
	p	0.183	0.998	0.142	< .001

Tabelle 10	Kaffeehaus	objektiv kongruente vs. inkongruente Bedingung	objektives Erinnerungsvermögen	subjektiv kongruente vs. inkongruente Bedingung	Subjektiv erklärtes Erinnerungsvermögen
Gefälligkeit	F	1.203	0.878	25.464	0.052
	p	0.276	0.351	< .001	0.819
Intensität	F	9.395	0.243	0.404	1.59
	p	0.003	0.623	0.527	0.211
Vertrautheit	F	0.414		11.028	0.83
	p	0.522	0.391	0.001	0.365
Kongruenz	F	0.796	5.492	279.94	0.06
	p	0.375	0.021	< .001	0.806
Unterhaltsamkeit	F	0.089	0.044	3.149	0.721
	p	0.767	0.835	0.079	0.398
Traurigkeit	F	0.041	2.053	3.365	0.026
	p	0.841	0.155	0.07	0.871
Aufgeregtheit	F	2.162	0.06	9.768	0.459
	p	0.145	0.808	0.002	0.5
Irritation	F	0.405	1.472	0.048	0.11
	p	0.526	0.228	0.828	0.741
Alarmiertheit	F	1.534	0.528	0.05	0.208
	p	0.219	0.469	0.823	0.649
Bereitschaft VR erneut zu sehen	F	0.56	2.024	3.181	0.105
	p	0.456	0.158	0.078	0.746
Videolänge	F	0.28	0.493	2.841	1.693
	p	0.598	0.485	0.095	0.197
Bewertung des Erinnerungsvermögens	F	0.492	4.906	1.07	154.265
	p	0.485	0.029	0.304	< .001

Tabelle 11	Küstenexpedition	objektiv kongruente vs. inkongruente Bedingung	objektives Erinnerungsvermögen	subjektiv kongruente vs. inkongruente Bedingung	subjektiv erklärtes Erinnerungsvermögen
Gefälligkeit	F	9.639	0.013	3.782	0.498
	p	0.003	0.911	0.055	0.482
Intensität	F	0.541	0.357	2.202	1.065
	p	0.464	0.552	0.141	0.305
Vertrautheit	F	0.036	0.119	0.299	1.915
	p	0.85	0.731	0.586	0.17
Kongruenz	F	4.396	0.027	295.313	0.169
	p	0.039	0.869	< .001	0.682
Unterhaltsamkeit	F	6.007	0.315	0.172	0.286
	p	0.016	0.576	0.68	0.594
Traurigkeit	F	1.671	1.694	0.052	5.285e -4
	p	0.2	0.197	0.821	0.982
Aufgeregtheit	F	1.075	2.354	0.564	0.489
	p	0.303	0.129	0.455	0.486
Irritation	F	0.631	0.003	0.26	2.086
	p	0.429	0.959	0.612	0.152
Alarmiertheit	F	5.516	0.051	1.883	0.004
	p	0.021	0.822	0.173	0.951
Bereitschaft VR erneut zu sehen	F	0.969	06.76	0.225	0.012
	p	0.328	0.011	0.636	0.912
Videolänge	F	2.311	0.005	0.517	0.013
	p	0.132	0.945	0.474	0.908
Bewertung des Erinnerungsvermögens	F	0.002	2.473	4.637	133.502
	p	0.969	0.119	0.034	< .001

Tabelle 12	Die Sternennacht	objektiv kongruente vs. inkongruente Bedingung	objektives Erinnerungsvermögen	subjektiv kongruente vs. inkongruente Bedingung	subjektiv erklärtes Erinnerungsvermögen
Gefälligkeit	F	4.617e -4	0.102	2.328	1.342
	p	0.983	0.75	0.131	0.25
Intensität	F	0.068	0.744	10.029	3.662
	p	0.794	0.391	0.002	0.059
Vertrautheit	F	0.128	3.064	0.128	0.563
	p	0.721	0.084	0.721	0.455
Kongruenz	F	0.075	0.268	346.093	4.299
	p	0.785	0.606	< .001	0.041
Unterhaltsamkeit	F	0.547	0.073	0.038	22.324
	p	0.462	0.788	0.845	< .001
Traurigkeit	F	0.273	1.133	0.732	0.262
	p	0.603	0.29	0.394	0.61
Aufgeregtheit	F	0.718	0.856	0.008	13.756
	p	0.399	0.357	0.931	< .001
Irritation	F	0.987	2.497	0.197	0.055
	p	0.323	0.118	0.658	0.815
Alarmiertheit	F	0.586	2.68	1.053	7.462
	p	0.446	0.105	0.308	0.008
Bereitschaft VR erneut zu sehen	F	0.028	0.043	3.005	11.279
	p	0.867	0.836	0.087	0.001
Videolänge	F	0.595	0.285	0.447	1.643
	p	0.443	0.595	0.506	0.203
Bewertung des Erinnerungsvermögens	F	0.544	8.230e -5	0.343	155.338
	p	0.463	0.993	0.56	< .001

Die Freiheitsgrade für die verlorenen Orte, das Kaffeehaus, die Küstenexpedition und die Sternennacht entsprechen in allen Spalten 1. Für den Restwert ergibt sich 88.