

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 von Gerüchen auf visuelle Wahrnehmung und Gedächtnis

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 2022

1. Gutachter:

2. Gutachter:

Tag der mündlichen Prüfung:

gez.: _____

Vorsitzender der Promotionskommission

Inhaltsverzeichnis

<i>Abkürzungsverzeichnis</i>	V
<i>1. Einleitung</i>	1
1.1 Fragestellung und Hypothesen	5
<i>2. Grundlagen</i>	6
2.1 Der Geruchssinn.....	6
2.2 Gedächtnis und Geruch.....	8
2.3 Elektroenzephalografie:	10
2.4 Frequenzbereiche im EEG.....	11
<i>3. Material und Methoden</i>	13
3.1 Proband*innen und Teilnahmekriterien.....	13
3.2 Einschlusskriterien.....	13
3.3 Ausschlusskriterien.....	13
3.4 Studiendesign.....	14
3.5 Methoden	15
3.6 Datenanalyse der Fragebögen	17
3.7 Datenanalyse der EEG-Daten	18
<i>4. Experimenteller Aufbau</i>	19
4.1 Ablauf und Durchführung.....	19
4.2 Telefonat zur erneuten Befragung der Proband*innen.....	25
<i>5. Datenanalyse</i>	26
5.1 Datenanalyse der Fragebögen	26
5.2 Datenanalyse der EEG-Daten	29
<i>6. Ergebnisse</i>	30
6.1 Basisdaten der Studienteilnehmer, deskriptive Statistik.....	30
6.2 Auswertung der Fragebögen	31
6.3 Auswertung der EEG-Daten	37
<i>7. Diskussion</i>	39
7.1 Diskussion der Ergebnisse	39
7.1.1 Wahrnehmung der VR-Umgebung unter kongruenten Bedingungen	39
7.1.2 Einfluss der Gedächtnisleistung auf Wahrnehmung der VR-Umgebung.....	42
7.1.3 Spezifische EEG-Veränderungen in VR-Umgebungen	43
7.2 Diskussion der Methoden	45
7.3 Limitationen und Herausforderungen.....	46
<i>8. Zusammenfassung</i>	48
<i>8. Summary</i>	50
<i>9. Literaturverzeichnis</i>	52
<i>10. Abbildungsverzeichnis</i>	61

11. Tabellenverzeichnis.....	62
12. Anhang.....	63
Danksagung.....	Fehler! Textmarke nicht definiert.
Anlage 1.....	Fehler! Textmarke nicht definiert.
Anlage 2.....	Fehler! Textmarke nicht definiert.

Abkürzungsverzeichnis

Ag	Argentum / Silber
AgCl	Argentum Chlorid / Silberchlorid
ANCOVA	Kovarianzanalyse / Analysis of Covariance
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
VR	Virtual Reality / Virtuelle Realität / VR

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 30er Jahren des vergangenen Jahrhunderts gibt es auch die Vorstellung einer virtuellen Realität.

Historische Einordnung

Der Begriff virtuelle Realität wurde das erste Mal im Jahr 1938 geprägt. Artaud verwendete ihn in seinem Buch *Le Théâtre et son double*. Die englische Übersetzung erschien 1959. Somit wurde das erste Mal Mitte des 20. Jahrhunderts von „Virtual Reality“ gesprochen (Artaud, 1938). Ein Vordenker der erlebbaren virtuellen Realität (VR) war Heilig. Dieser schrieb ab den 1950er Jahren 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 (Heilig, 1962). Das Sensorama sollte sowohl audiovisuelle Reize setzen als auch olfaktorische und taktile Sinneseindrücke vermitteln. Hierfür nutzte er zum einen Farb- und Gerüche, zum anderen aber auch das taktile Erleben, welches durch Wind aus Ventilatoren simuliert wurde. Morton Heilig hatte also schon 1962 verstanden, dass erlebte Realität nicht nur durch einen sensorischen Reiz geschaffen werden kann.

Virtuelle Realität Heute

Heutzutage schafft Virtuelle Realität eine computersimulierte, realistische, interaktive, dynamische und multidimensionale Umgebung, die das echte Leben simulieren kann (Mazza et al., 2021). Die Benutzenden tragen ein Headset, das einen Großteil der Eindrücke aus der äußeren Umgebung beseitigt und neue Eindrücke innerhalb der inneren Umgebung entstehen lässt (Herz, 2021). VR kann so eine sensorische und psychologische Wirklichkeit erschaffen und somit auch 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). VR wird heute breit eingesetzt und ist ein essenzieller Bestandteil in multiplen Bereichen. Ob 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 schaffen durch eine realistische Imitation der Realität eine hohe ökologische Validität, durch die künstliche Umgebungen wie z. B. Laboreindrücke überwunden

werden können (Mazza et al., 2021). So kann durch VR sowohl Kognition, Gehirnaktivität, Aufmerksamkeit, aber auch physiologische Reaktionen und sogar der Affekt beeinflusst werden (Mazza et al., 2021). Durch die streng kontrollierbaren Bedingungen, die Standardisierungsmöglichkeiten und die Wiederholbarkeit ohne räumliche oder zeitliche Einschränkungen dient VR als leistungsstarkes Instrument. So birgt es das Potential, Labor- und klinische Methoden bezüglich Effektstärke zu übertreffen (Mazza et al., 2021).

Um möglichst gute Effekte zu erzielen, braucht es ein realistisches Erleben und Wahrnehmen.

Präsenz und Immersion

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

Auvray und Spence (2008) beschrieben, dass Erlebnisse oft durch multimodale sensorische Reizaktivierung real und angenehm erscheinen. So wird ein gutes Essen nicht alleine durch den Geschmack ausgemacht. Auch Konsistenz, Aussehen, Geruch und sogar Geräusche während des Essens, führen zu einem vollumfänglichen Erleben (Auvray und Spence, 2008). Immersive VR schafft eine dreidimensionale (3-D) Illusion der Realität in der ersten Person, bei der die äußere Welt durch die virtuelle Welt ersetzt wird (Rizzo und 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 auf visuelle und auditive Stimulationen (Herz, 2021).

Der technische Fortschritt konzentrierte sich in den letzten Jahren vor allem auf die Verbesserung der visuellen Reize. Je näher die visuellen Reize der Realität kommen, desto höher ist das Präsenzgefühl (Dinh et al., 1999). 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). VR ist gegenwärtig entweder über einen betretbaren Raum oder über eine Brille zu erleben, wodurch eine virtuelle Realität simuliert wird. Der betretbare Raum ist mit Sensoren ausgestattet und nennt sich Cave Automatic Virtual Environment. Die Brille hingegen integriert die Kopfbewegung des Zuschauenden über ein auf dem Kopf-getragenes-Display.

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 kostspielig und für Laien schwer zu bedienen sind (Risso et al., 2018).

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).

Geruchssinn und VR

Der Geruchssinn, als der evolutionär älteste und unmittelbarste unserer Sinne, kann VR-Umgebungen modulieren und ist besonders bedeutend bei der Schaffung einer immersiven Abbildung der Realität. Gerüche sind nicht nur eine Schlüsselkomponente der gelebten Erfahrung, sondern auch besonders emotionale und viszerale Reize (Herz und Schooler, 2002). Gerüche können die Aufmerksamkeit lenken, das Präsenzgefühl erhöhen und so für einen besseren mentalen Zustand sorgen (Chen, 2006).

Erinnerungsvermögen und VR

Der Geruchssinn bietet die Möglichkeit in VR-Umgebung, die Gedächtnisleistung durch eine höhere neuronale Vernetzung zu verbessern (Chen, 2006). Dabei steigen Präsenzgefühl, Unterhaltungswert und Erinnerungsvermögen, in Abhängigkeit der Anzahl aktivierter Sinne (Gallace et al., 2012).

Erinnerung und Geruch

Willander und Larsson (2006) bestätigten, dass Gedächtnis und Geruch eng miteinander verknüpft sind. So fühlten sich Proband*innen stärker in die Vergangenheit versetzt, die durch Gerüche an Ereignisse erinnert wurden, als wenn dies durch verbale Reize geschah. Durch Geruch ausgelöste Erinnerungen sind emotional stärker vernetzt als zum Beispiel durch Worte oder Bilder ausgelöste Erinnerungen und können eine höhere Emotionalität auslösen (Herz und Cupchik, 1995; Herz und Engen, 1996; Herz et al., 2004).

Gedächtnis und Geruch in VR-Umgebungen

Auch für VR-Umgebungen konnte gezeigt werden, dass Gedächtnis und Geruch in direkter Beziehung zueinander stehen und sich somit beeinflussen (Dinh et al., 1999; Moore et al., 2015; Tortell et al., 2007). Moore et al. (2015) erforschten die Auswirkungen von zusätzlichen olfaktorischen Einflüssen 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 Enkodierung zu lernender Inhalte einschränkt. Des Weiteren zeigten Dinh et al., (1999), 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 Ventilatorgeräusche, 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 verbesserten Erinnerungsvermögen erhöhte sich auch das Präsenzgefühl der Teilnehmenden. Gleichzeitig fanden sie heraus, dass eine verbesserte visuelle Darstellung der VR keinen verbessernden Effekt hat, weder auf das Präsenzgefühl noch auf das Erinnerungsvermögen. Wie sehr eine Erfahrung emotional vertieft wird, hängt davon ab, wie angenehm die Sinneserfahrung erlebt wird (Cabanac, 2002). Als Folge wird etwas, das als angenehm empfunden wird, mit Behaglichkeit gleichgesetzt. Als besonders entscheidend für das Gefühl der Behaglichkeit, hat sich die Kongruenz der Sinneserfahrungen gezeigt (Seo et al., 2014).

Kongruenz und VR-Umgebung

Kongruente Sinneserfahrungen führen für gewöhnlich zu einer verbesserten Leistung (Rihm et al., 2014; Seo et al., 2010, 2014; Seo und Hummel, 2011), wohingegen inkongruente Sinneserfahrungen die Leistungsfähigkeit einschränkt (Niedenthal et al., 2019; Streeter und White, 1986).

In dieser Arbeit wird neben den Auswirkungen von Kongruenz und Inkongruenz auf die Gedächtnisleistung zudem untersucht, ob das Gedächtnisniveau der Teilnehmenden einen Einfluss auf die Wahrnehmung von VR-Umgebungen hat.

VR-Umgebungen und EEG

1962 konnte Moncreiff zeigen, dass EEG-Aktivität im Alpha-Wellenbereich, welcher 8-13 Hz entspricht, während olfaktorischer Stimulation abnahm. Die Abnahme der Alpha-Aktivität ist ein Hinweis für die gesteigerte Aufmerksamkeit und eine erhöhte kognitive Aktivität (Yingling,1980). Moruzzi und Magoun (1949) haben beobachtet, dass eine sensorische Stimulation häufig zu einer Abnahme der Theta-Wellen (4-7 Hz.) führt. Dies deutet auf eine Abnahme von Entspannung hin. Lorig und 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 (Lorig und Schwartz, 1988). Unsere Studie prüft, ob bestimmte Düfte spezifische Effekte im EEG erkennen lassen.

1.1 Fragestellung und Hypothesen

Um die Auswirkungen von Kongruenz und Inkongruenz auf die Gedächtnisleistung in einer VR-Umgebung weiter zu untersuchen, stellten wir drei Hypothesen auf.

Hypothese 1: Proband*innen, welche die VR-Umgebungen subjektiv und objektiv als kongruenter wahrnehmen, erinnern sich später detailreicher und positiver an die Umgebung

Hypothese 2: Teilnehmenden mit einem subjektiv erklärten und objektiv gemessenen besseren Gedächtnisleistung bewerten die VR-Umgebung positiver als Teilnehmende mit niedrigerer Gedächtnisleistung.

Hypothese 3: Bestimmte Düfte in VR-Umgebungen rufen spezifische EEG-Veränderungen hervor.

2. Grundlagen

2.1 Der Geruchssinn

Im Folgenden soll ein wesentlicher Überblick über das olfaktorische System geschaffen werden. Das Hauptaugenmerk liegt auf der zentralen Verarbeitung von Düften.

Geruchsneurone weisen eine deutlich langsamere Leitgeschwindigkeit auf als z.B. Neurone, die somatosensorische Reize verarbeiten. Ursächlich hierfür ist, dass die Geruchsneurone nicht myelinisiert sind. Wenn der Geruch jedoch erst detektiert ist, hält er auch länger an als andere sensorische Reize (Herz und Engen, 1996).

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 für die lebenslange Regeneration der ORN zuständig, insbesondere nach einer Schädigung (Huppelsberg und 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 und Wiesmann, 2006). Die Axone der olfaktorischen Rezeptorneurone bilden die Fila olfactoria, die sich zum Nervus olfactorius bündeln. Die Fasern der Fila olfactoria ziehen zum Bulbus olfactorius und konvergieren dort. 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 Interneurone neu zu bilden (Curtis et al., 2007) und wird aufgrund seiner Prozessierungsfunktion auch olfaktorischer Thalamus genannt (Doty, 2012). Die Axone der Riechzelle werden über glutamaterge exzitatorische Synapsen mit Dendriten der Mitralzellen verbunden. Diese bilden die von Glia umhüllten Glomeruli, welche als zweite Neurone wirken. In ihnen werden etwa 1000 Axone einer Riechzelle auf eine Mitralzelle projiziert (Hummel et al., 2009; Müller et al., 2005). Die Konvergenz der Axone führt zu einer Reduktion von Informationen. Ein weiterer Mechanismus zur Kontrastverstärkung und Differenzierung nennt sich laterale Inhibition und findet in den Glomeruli statt.

Periglomeruläre Zellen wirken über dopaminerge und gabaerge inhibitorische Synapsen auf benachbarte Mitral- und Büschelzellen (Witt und 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 und die sensorischen Signale weiter in den sekundären olfaktorischen Cortex leitet.

Sekundär olfaktorische Strukturen

Zu den sekundär olfaktorischen Strukturen gehören der Nucleus olfactorius anterior, der Cortex piriformis, die mediale Amygdala, das ventrale Striatum und ein Teil des entorhinalen Cortex.

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). Entorhinaler Cortex und Amygdala beeinflussen das olfaktorische Gedächtnis (Freiherr et al., 2014), wobei die Amygdala außerdem an der emotionalen Einordnung des olfaktorischen Reizes beteiligt ist. Der piriforme Cortex dient als maßgeblicher Projektionsort, dort finden diverse Prozessierungen statt, wie zum Beispiel Bewertungen, ob ein Duft angenehm oder unangenehm ist. Es wird also die Hedonik eines Geruchs beurteilt. Zudem hat der piriforme Cortex zahlreiche Verbindungen zu tertiären olfaktorischen Strukturen.

Tertiäre olfaktorische Strukturen

Diese tertiären olfaktorischen Strukturen bestehen aus Inselcortex, Hippocampus, ventralem Striatum, Nuclei septales, Cortex orbitofrontalis sowie Anteilen des Hypothalamus. Im Inselcortex sowie im orbitofrontalen Cortex werden verschiedene chemosensorische Informationen integriert und verarbeitet (Freiherr et al., 2014; Lundström et al., 2010).

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass chemosensorische Integration olfaktorischer Reize und anderer sensorischer Eindrücke vor allem im Neo- und Mesocortex stattfindet (Hummel et al., 2009), wohingegen die Verarbeitung der Geruchsinformation vor allem im Telencephalon und somit dem phylogenetisch älteren Teil des Gehirns stattfindet.

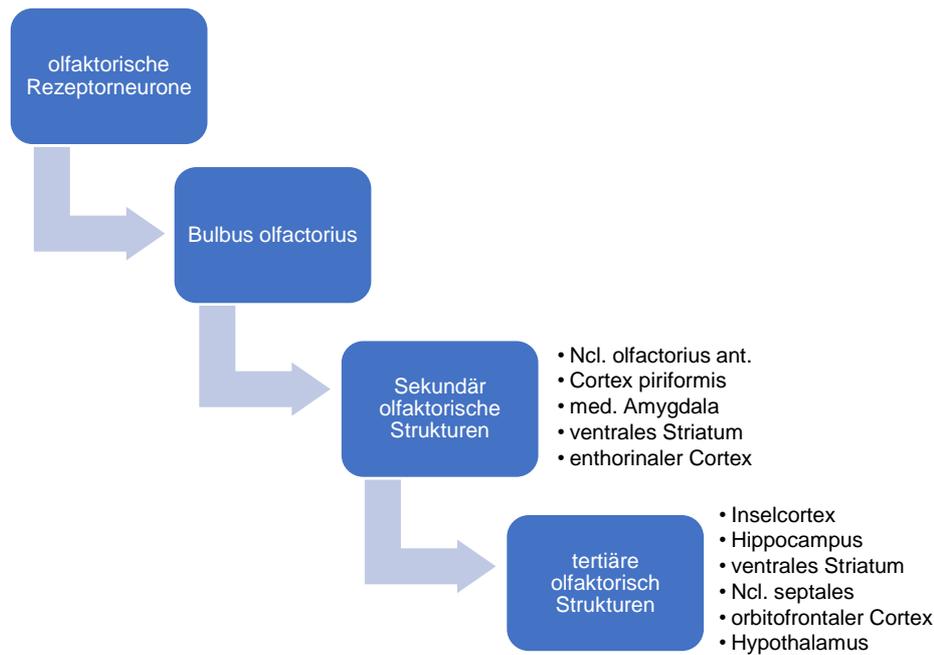


Abbildung 1: Eigene Darstellung der zentralen Verarbeitung olfaktorischer Sinneseindrücke.

2.2 Gedächtnis und Geruch

Es ist bekannt, dass Gerüche und Geschmäcker Erinnerungen unmittelbar direkt präsent erscheinen lassen können. Dieser Effekt wird Proust-Phänomen genannt (Toffolo et al., 2012). In einem Experiment untersuchten Toffolo und Kolleg*innen (2012) 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.

Auch Sullivan et al. (2015) beschrieben, dass Gerüche, beeinflusst von vorangegangenen Erlebnissen, eng mit Emotionen sowie Gedächtnis und Lernen verknüpft sind. Die neuronale Grundlage hierfür entsteht durch den einzigartigen Aufbau der Riehbahn. Die Riehbahn umgeht als einzige sensorische Bahn die erneute Verschaltung im Thalamus (Herz und 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 in ihm erneut verschaltet werden, bevor sie ins Großhirn weitergeleitet

werden (Sabri et al., 2005). Die direkte Verbindung der Geruchsbahn zum limbischen System erklärt, warum Geruch, Gedächtnisbildung, Affekt und Verhalten so eng verknüpft sind.

Zum limbischen System gehören unter anderem auch der Hippocampus und die Amygdala. Der Hippocampus hat multiple Aufgaben: Er ist für die Transformation vom Kurzzeitgedächtnis ins Langzeitgedächtnis zuständig, selektiert und filtert Informationen, wirkt an deklarativen Gedächtnisfunktionen mit und sorgt dafür, dass Informationen abgerufen werden können (Ergorul und Eichenbaum, 2004; Schwerdtfeger et al., 1990; Staubli et al., 1986). Herz und Engen (1996) beschrieben, dass zwischen olfaktorischen Rezeptorneuronen und Hippocampus nur drei Synapsen liegen.

Von der Amygdala hingegen sind die olfaktorischen Rezeptorneurone durch lediglich zwei Synapsen getrennt (Herz und Engen, 1996). Die Amygdala ist beteiligt am Erleben von Emotionen, (Cahill et al., 1995) während das limbische System im Allgemeinen für assoziatives Lernen und Emotionen zuständig ist (Canli et al., 2000).

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

Abschließend lässt sich sagen, dass die Verbindungen zwischen Gedächtnis und Geruch vielfältig und beziehungsreich sind.

2.3 Elektroenzephalografie:

Um Gehirnaktivität in Interaktion mit VR-Umgebungen effektiv zu messen 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).

Die Elektroenzephalografie geht zurück auf Berger, der die ersten Untersuchungen 1924 durchführte und ab 1929 dazu veröffentlichte (Berger, 1932).

Das EEG ist ein nichtinvasives 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, Hagemann und Haueisen, 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 und Hofer, 2013).

Abgeleitet wird das EEG nach dem internationalen 10/20 System, welches Jasper 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 mit anderen bildgebenden Verfahren wie PET oder fMRT, relativ stabil was Bewegungsartefakte angeht (Davidson, 2007).

2.4 Frequenzbereiche im EEG

Das entscheidende Merkmal im EEG ist die Frequenz (Zschoke und 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 und Dovey, 1944).

Delta-Wellen

Delta-Wellen entsprechen Frequenzen von kleiner oder gleich 4 Hertz. Sie treten vor allem im Tiefschlaf auf 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 und 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. Material und Methoden

3.1 Proband*innen und Teilnahme Kriterien

In der experimentellen Studie wurde die Auswirkung von olfaktorischen Reizen, die gemeinsam mit VR-Videos präsentiert wurden, auf Wahrnehmung und Gedächtnis untersucht. 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.

3.2 Einschlusskriterien

Alter > 18 Jahre

Gesunde Proband*innen

Freiwillige Teilnahme

Normale Kognition, nachgewiesen durch den MoCA-Test

Normale Riechfunktion nachgewiesen durch einen 3-Item-Geruchsidentifikationstest mithilfe der Sniffin' Sticks

3.3 Ausschlusskriterien

Alter unter 18 Jahren

Schwangerschaft

Wesentliche gesundheitliche Beeinträchtigung (z. B. Niereninsuffizienz, M. Parkinson, Tumoren des Mund- und Rachenraums)

Akute oder chronische Entzündungen der Nase oder Nasennebenhöhlen

3.4 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. Eingeschlossen wurden gesunde Proband*innen, die ein Mindestalter von 18 Jahren erreicht hatten. Ausschlusskriterien waren akute oder chronische Entzündungen der Nasen oder Nasennebenhöhlen sowie eine wesentliche gesundheitliche Beeinträchtigung zum Beispiel durch Niereninsuffizienz, M. Parkinson, Tumoren des Mund- und Rachenraums oder Schwangerschaft.

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

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.

3.5 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. Sie 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.

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, was ein normales Funktionsniveau darstellt.

Sniffin' Sticks

Für die Testung der Riechfunktion wurde ein 3-Item-Geruchsidentifikationstest mithilfe der Sniffin' Sticks (Burghart Messtechnik, Holm, Deutschland) durchgeführt, um die normale olfaktorische Wahrnehmung der Teilnehmer*innen zu ermitteln (Sorokowska et al., 2019). 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 1).

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.

Tabelle 1: Drei-Komponenten-Identifikationstest Sniffin' Stick

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



Abbildung 3: 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.

Pro Video wurde das EEG für jeweils 3 Minuten, mit Hilfe des Programms ActiView, ebenfalls von Biosemi, Niederlande, aufgezeichnet. Als Ableitpositionen wurden F3, F7, FZ, F4 und F8 genutzt.

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), erstellt. Hierfür werden einzelne Frequenzen herausgefiltert, zerlegt und analysiert.

3.6 Datenanalyse der Fragebögen

Für die Datenanalyse wurden fünf Kovarianzanalysen ANCOVA durchgeführt, die mit Ausnahme der ersten Bedingung für alle fünf Videos gesondert erstellt wurden: [a] Tulpenfeld, [b] verlorene Orte, [c] Kaffeehaus, [d] Küstenexpedition und [f] Sternennacht. Hierfür wurden Daten aus der Befragung unmittelbar nach Erleben des Videos mit denen aus der erneuten Befragung verglichen und in Relation gesetzt (s.u.). Es wurden für die Datenanalyse vier Vorhersagevariablen erstellt. Die Daten werden als Mittelwerte (\pm Standardabweichung) dargestellt. Statistische Analysen wurden mit JASP v. 0.11.1 (Univ. of Amsterdam, Niederlande: www.jasp-stats.org) durchgeführt, wobei $p < .05$ als Signifikanzniveau festgelegt wurde.

3.7 Datenanalyse der EEG-Daten

Mithilfe der EEG-Daten wurde, die während der Videodarbietung gemessene Hirnaktivität, analysiert. Hierfür mussten die Oszillationen in eine Zeit-Frequenz-Darstellung überführt werden. Das bedeutet, dass Signale, die vorher in einem Zeitbereich dargestellt wurden, in eine Frequenzdarstellung konvertiert werden mussten (Hoffmann, 1999).

Die Zerlegung des Signals ist jedoch sehr komplex, da sich die Frequenzen einzelner Amplituden überschneiden können. Bei der Zerlegung des Signals ist die Fourier-Analyse (Hoffmann, 1999) hilfreich. Benannt ist dieses Verfahren nach dem Entwickler Fourier (1768-1830). Für zeitdiskrete, zeitkontinuierliche, periodische und nichtperiodische Signale gibt es unterschiedliche Analyseverfahren.

Mit dem Computer können nur zeitdiskrete Signale verarbeitet werden, weshalb hier nur die diskrete Fourier-Analyse infrage kommt. Für dieses Verfahren muss das Signal periodisch oder zumindest periodisch fortgesetzt sein.

Durch die diskrete Fourier-Transformation (DFT) werden die Zeitsignale in Sinus- und Cosinus-Funktionen zerlegt, welche festgelegte Amplituden- sowie auch Frequenzwerte besitzen.

Nicht zu unterschätzen ist jedoch der Rechenaufwand, weshalb wir diesen nach der DFT mit einem optimierten Algorithmus, der Fast-Fourier-Transformation, deutlich verringerten.

Die EEG-Aufzeichnungen wurden für jeden Teilnehmer für jedes der fünf Videos durchgeführt. Es wurden nur Teilnehmer der ersten Gruppe in der kongruenten Bedingung untersucht.

Wir erstellten vier separate Modelle, jedes für ein einzelnes Frequenzband.

Für jedes Modell wurde das Akaike-Informationskriterium (AIC), als Schätzer für die relative Qualität ermittelt. 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.

4. Experimenteller Aufbau

4.1 Ablauf und Durchführung

Bei der ersten Sitzung bekamen alle Proband*innen zunächst das EEG angelegt. 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 fünf 360-Grad-Filme mittels Youtube.com von (Google LLC 2021, San Bruno, Kalifornien, USA) gezeigt.

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



Die
Küstenexpedition



Verlorene Orte



Das Tulpenfeld



Das Kaffeehaus



Die Sternennacht

Abbildung 4: Videos die den Proband*innen vorgespielt wurden.

Die Filme wurden den Teilnehmenden exakt 3 Minuten präsentiert und wurden so ausgewählt, dass sie über die visuell vermittelten Bilder eine olfaktorische Assoziation hervorrufen sollten. Zwei Filme sollten als angenehm und zwei weitere als unangenehm empfunden werden. Ein Video sollte neutrale Empfindung hervorrufen. Hierfür wurde die Visualisierung der Sternennacht von Van Gogh bestimmt.

Als ansprechende Filme wurden das Tulpenfeld und das Kaffeehaus ausgesucht.

Das Tulpenfeld

In dem Video spazieren die Teilnehmenden virtuell durch einen Park mit verschiedenfarbigen Tulpen. Im Video sind ebenfalls andere Blumen zu sehen und auch anderen Besucher*innen.

Das Kaffeehaus

In diesem Video bereitet ein Barista Kaffee zu und unterhält sich währenddessen mit Kund*innen. Das Video schafft eine angenehme und gemütliche Umgebung.

Als allgemein unangenehme Videos wurden verlorene Orte und die Küstenexpedition ausgesucht.

Verlorene Orte

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

die Küstenexpedition

In diesem Video 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.

Als neutrales Video diente die Sternennacht

Die Sternennacht

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 und dann in eins der Gebäude, in dem man dann das Interieur betrachten kann.

Der neutrale Film sollte keine olfaktorischen Assoziationen entstehen lassen.

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 und somit hilft, eine akustische Ablenkung zu vermeiden.

Zu Beginn der Filme bekamen alle Proband*innen Nasenclips. 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.

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

Die ausgesuchten Aromen sollten jeweils zwei angenehme und zwei unangenehme sowie zwei bekannte und zwei unbekannte Gerüche abdecken (Siehe Abbildung 5)

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

Abbildung 5: Auswahl der jeweiligen Duftstoffe

Angenehm bekannt

Schokolade wurde als angenehm bekannt 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.

Angenehm unbekannt

Als angenehm unbekannter Duft 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 unangenehm bekannt 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.

Unangenehm 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.

Kontrollgruppe

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 passenden 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 entsprechenden 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 6: Probandin mit angebrachten 64-Kanal-EEG, VR-Brille, sowie Kopfhörer auf dem Versuchsstuhl.

Den Teilnehmenden wurden daraufhin folgende Anweisung gegeben: „Sie werden fünf Videos sehen, während Sie verschiedene Gerüche aus einem Nasenclip riechen. Wir werden 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 wir Ihnen einige Fragen zum Video stellen.“

Nach jedem Video wurde eine Befragung mit den Teilnehmenden durchgeführt. Hierfür wurden alle vorherig 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.

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 Gesichtsassessoire?

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?

4.2 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 erneuten Befragung 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.

Zusätzlich wurde bei der erneuten telefonischen Befragung gefragt, 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.

5. Datenanalyse

5.1 Datenanalyse der Fragebögen

Es wurden für die Datenanalyse vier Vorhersagevariablen erstellt.

Objektive Kongruenz

Die Vorhersagevariable ist in dieser Kategorie die tatsächliche objektive Einteilung in kongruente vs. inkongruente VR-Bedingungen

2) Subjektive Kongruenz

In dieser Kategorie geht es um die subjektiv wahrgenommene Einteilung von kongruenten vs. inkongruenten VR-Bedingungen. Hatten die Proband*innen VR-Umgebung und Geruch als kongruent wahrgenommen, wurden sie der Kongruenz-Gruppe zugeordnet, andernfalls der Inkongruenz-Gruppe.

3) Objektives Erinnerungsvermögen

Hierfür wurde in jedem Film eine der fünf Fragen ausgewählt (Siehe Tabelle 3). Bei richtiger Aussage gab es einen Punkt, bei Falschaussage keinen. Somit konnte auch hier in zwei Gruppen unterschieden werden, eine Gruppe mit objektiv besserer Gedächtnisleistung und eine Gruppe mit objektiv schlechterer Gedächtnisleistung.

Tabelle 4: Ausgewählte Fragen zur Auswertung des Erinnerungsvermögens

VR-Präsentation	Item
Tulpenfeld	Welche Blumenfarben wurden gesehen? (1-richtig, 0- nicht erinnert)
verlorene Orte	Was für ein Raum war die erste indoor Location? (1- richtig, 0-nicht erinnert)
Kaffeehaus	Welche Farbe hatte das T-Shirt vom Barista ? (1- richtig, 0- nicht erinnert)
Küstenexpedition	Welche Farbe hatte die Jacke des Arbeiters? (1- richtig, 0- nicht erinnert)
Sternennacht	Welche Farbe hatte das Haus von außen ? (1- richtig, 0- nicht erinnert)

4) Subjektive Gedächtnisleistung.

Dieses Item wurde in der erneuten Befragung für jedes Video abgefragt („Wie würden sie ihre Erinnerung in Bezug auf dieses Video auf einer Skala von 0 (gar keine Erinnerung) bis 10 (sehr gute Erinnerungen) bewerten?“) und diente der Unterscheidung in zwei Gruppen: Jene, die ihr Erinnerungsvermögen als subjektiv gut beschrieben und jene, die ihr Erinnerungsvermögen für dieses spezielle Video als subjektiv schlecht einschätzten.

Für die Datenanalyse wurden nun die zwei objektiven Variablen [1] objektive Kongruenz; [2] objektives Erinnerungsvermögen als fixe Faktoren und zwei subjektive Maße [3] subjektive Kongruenz; [4] subjektive Gedächtnisleistung verwendet. Bemerkenswert 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. Für die Analyse, wie oft VR und Geruch als kongruent erkannt wurden, wurden Häufigkeitstabellen erstellt. Außerdem wurde für jedes Video eine Varianzanalyse durchgeführt, um zu beleuchten, welcher der Gerüche für diese VR-Umgebung am kongruentesten wahrgenommen wurde. Als fester Faktor wurde hierbei die Gruppenzugehörigkeit genutzt und als abhängige Variable die subjektiv wahrgenommene Kongruenz. Zur Kontrolle für Mehrfachvergleiche wurden Bonferroni-Korrekturen angewandt, um die Wahrscheinlichkeit eines Fehlers vom Typ eins zu verringern.

Bedingungen							
Actual congruent	actual incongruent	subjektiv kongruent	subjektiv inkongruent	tatsächlich hohes Gedächtnisniveau	tatsächlich niedriges Gedächtnisniveau	selbsterklärtes hohes Gedächtnisniveau	selbsterklärt niedriges Gedächtnisniveau
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

Abbildung 7: Darstellung der individuellen Bedingungen

5.2 Datenanalyse der EEG-Daten

Die EEG-Aufzeichnungen wurden für jeden Teilnehmer für jedes der fünf Videos durchgeführt. Folglich wurden nur Teilnehmer der ersten Gruppe in der kongruenten Bedingung untersucht.

Um zu prüfen, ob Kongruenz bzw. Inkongruenz die Frequenzbänder (Alpha, Beta Delta, Theta,) über alle Sitzungen hinweg beeinflusst, verwendeten wir für jedes Frequenzband getrennt ein lineares gemischtes Modell.

Aufgrund der Clusterung der Stichproben wählten wir das Linear Mixed Model (Oskolkov, 2020)

Alle Teilnehmer*innen nahmen an allen fünf Sitzungen teil.

Als abhängige Variable wurde das individuelle Frequenzband gewählt. Als Gruppierungsfaktor mit zufälligen Effekten wurde die Anzahl der Proband*innen gewählt und als Variable mit festen Effekten entschieden wir uns für die Kongruenz (1 - ja, 0 - nein) gemeinsam mit dem Kanal (1, 2, 3, 4, 5).

Um zu untersuchen ob die einzelnen Kanäle nicht zwischen den Frequenzbändern unterscheiden, entschieden wir uns die Kanalvariable hinzuzufügen.

Wir erstellten vier separate Modelle, jedes für ein einzelnes Frequenzband.

Für jedes Modell wurde das Akaike-Informationskriterium (AIC), als Schätzer für die relative Qualität ermittelt. Das 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, da dieser die Menge an verlorengangenen Informationen schätzt und somit das beste Gleichgewicht zwischen Modellanpassung und Verallgemeinerbarkeit anzeigt (Zajic, 2019).

6. Ergebnisse

6.1 Basisdaten der Studienteilnehmer, 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 in die Statistik aufgenommen 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 5).

Tabelle 5: 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

6.2 Auswertung der Fragebögen

Alle Kovarianzanalysen von Abbildung 8-12 sind im Anhang einzusehen.

Tulpenfeld

Die objektive Kongruenz von VR-Umgebung und Geruch wurde signifikant stärker wahrgenommen als unter inkongruenten Bedingungen $F[1,90] = 6,08, p = .016$ (Abbildung 2). Außerdem wurde eine subjektiv wahrgenommene Kongruenz von VR und Geruch als angenehmer empfunden ($F[1,90] = 10.28, p = .002$).

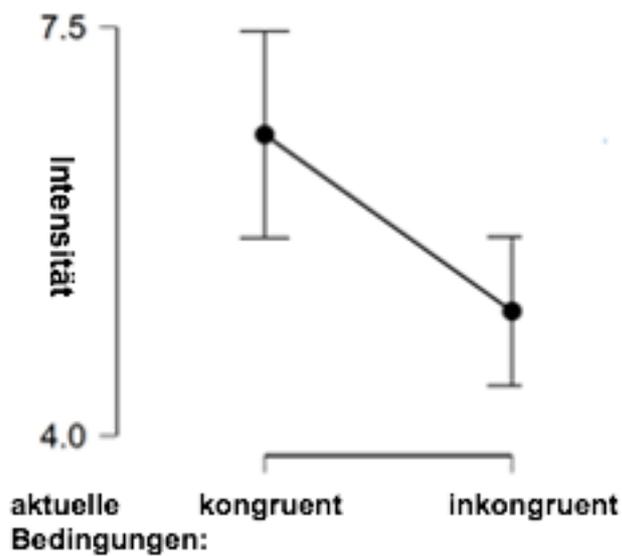


Abbildung 8: Tulpenfeld: Wahrgenommene Intensität des Geruchs unter kongruenten und inkongruenten Bedingungen

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 9a). Im Gegensatz dazu wurde das Video in der subjektiv wahrgenommenen kongruenten Bedingung als angenehmer empfunden als in der subjektiv als inkongruent empfundenen Bedingung. ($F[1,88] = 4.1, p = .046$) (Abbildung 9b)

Zudem wurde unter objektiv inkongruenten Geruchsbedingungen die VR-Umgebung ebenfalls als vertrauter empfunden ($F[1,88] = 17.2, p < .001$) (siehe Abbildung 9).

Proband*innen die ein niedrigeres Erinnerungsvermögen hatten, waren irritierter ($F[1,88] = 9, p = .003$) bzw. beunruhigter ($F[1,88] = 6.38, p = .013$) als Teilnehmende mit einem höheren Erinnerungsvermögen (siehe Abbildung 9).

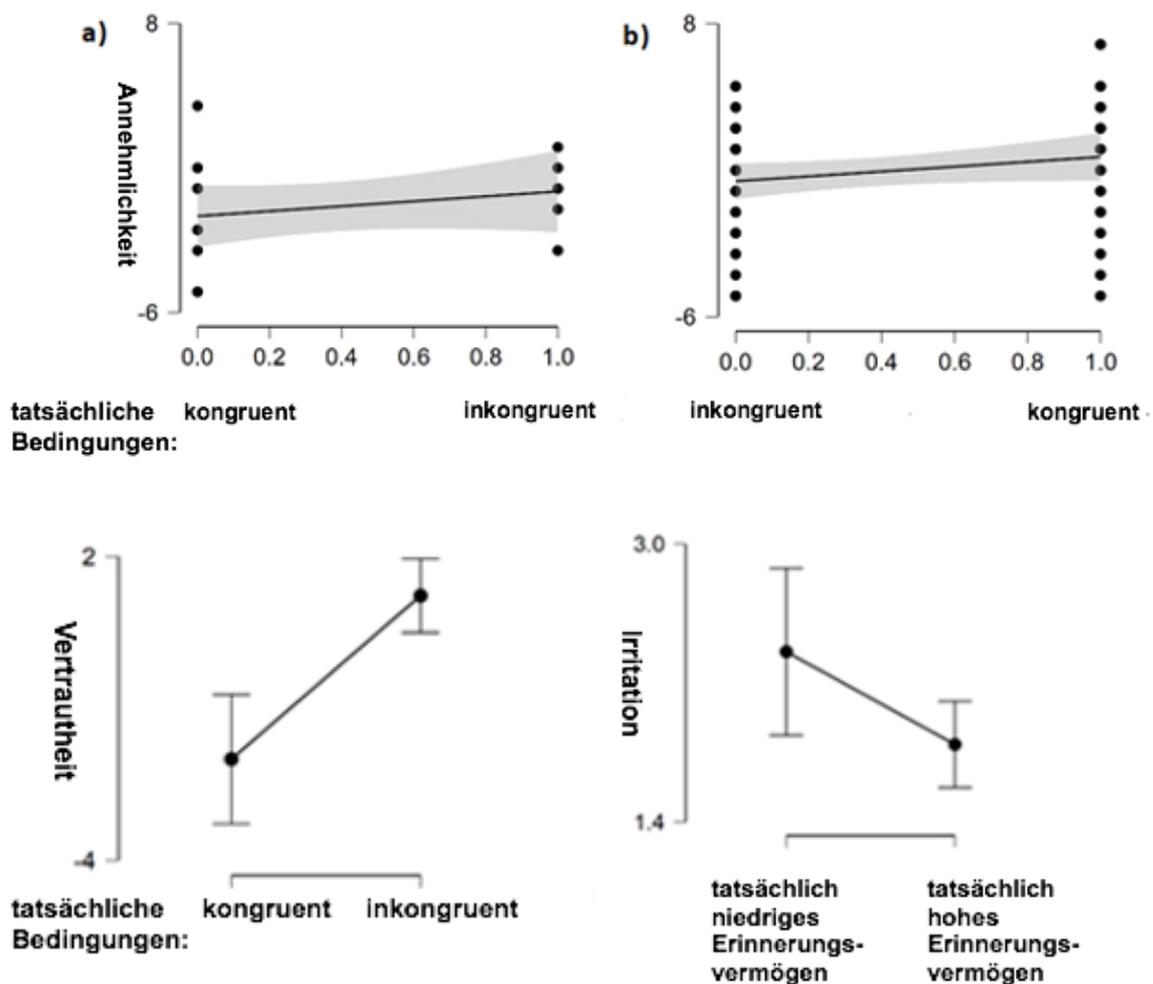


Abbildung 9: Verlorene Orte: Empfundene Annehmlichkeit unter a) objektiv kongruenten bzw. inkongruenten Bedingungen und b) subjektiv empfundener Kongruenz bzw. Inkongruenz. (obere Reihe). Vertrautheit unter tatsächlich kongruenten und inkongruenten Bedingungen (unten links) und Irritiertheit bezogen auf eine tatsächlich bessere bzw. ein tatsächlich schlechtere Gedächtnisleistung (unten rechts).

Kaffeehaus

Die subjektiv wahrgenommene Annehmlichkeit wurde unter subjektiv kongruenten Bedingung höher eingeschätzt als unter inkongruenten Bedingungen ($F[1,88] = 9,77, p = .002$) (Abbildung 10 oben links). Außerdem wird sie als aufregender ($F[1,88] = 25,46, p < .001$) (siehe Abbildung 10 unten links) und vertrauter ($F[1,88] = 11, p = .001$) (siehe Abbildung 10 oben rechts) 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 10 unten rechts).

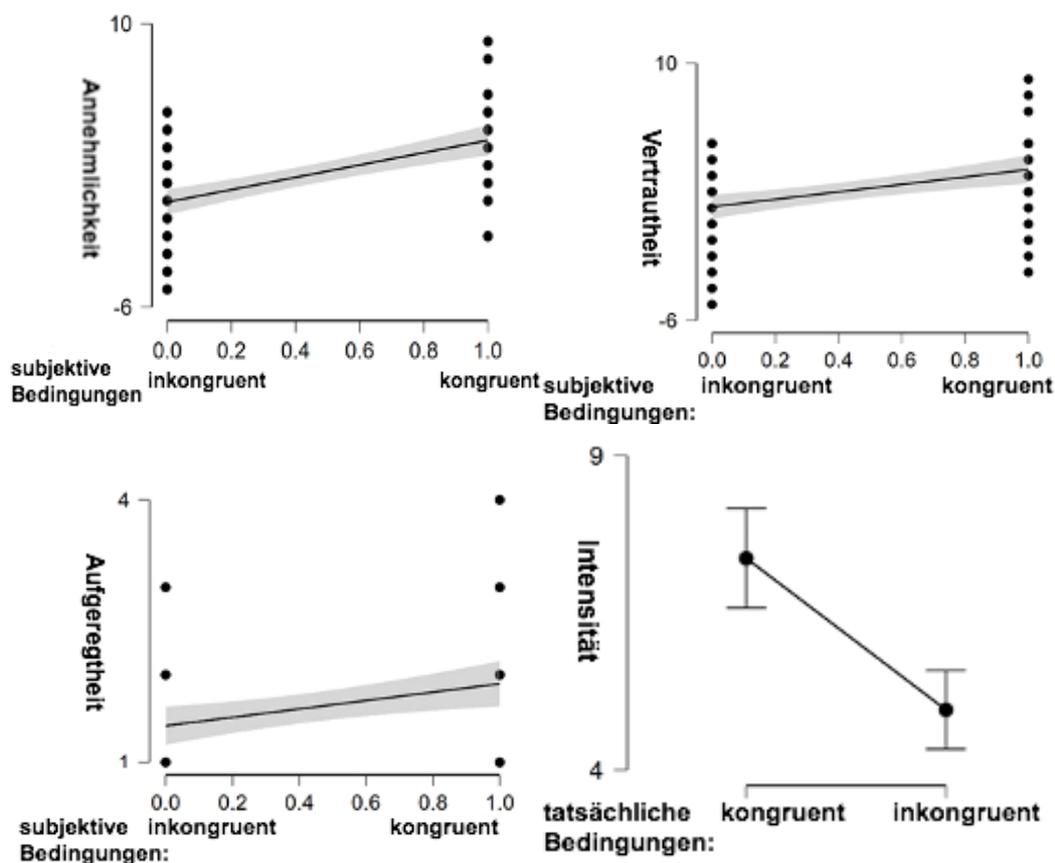


Abbildung 10: Kaffeehaus: Annehmlichkeit (oben links), Vertrautheit (unten links) und Aufgeregtheit (oben rechts) unter subjektiv wahrgenommener Kongruenz im Vergleich zur Inkongruenz. Wahrgenommene Intensität des Geruchs unter tatsächlich kongruenten bzw. inkongruenten Bedingungen (unten rechts) (* $p < .05$), (** $p < .001$).

Küstenexpedition

Unter objektiv inkongruenten Bedingung schätzten die Proband*innen das VR-Erlebnis als angenehmer ($F[1,88] = 9.64, p = .003$) (siehe Abbildung 11 oben links) und unterhaltsamer ($F[1,88] = 6, p = .016$) (siehe Abbildung 11 oben rechts) 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 11 unten links). Außerdem ist zu sehen, dass die Bereitschaft sich das Video erneut anzuschauen, bei tatsächlich höherem Erinnerungsvermögen größer ist als bei niedrigerem Erinnerungsniveau ($F[1,88] = 6,76, p = .011$) (siehe Abbildung 11 unten rechts).

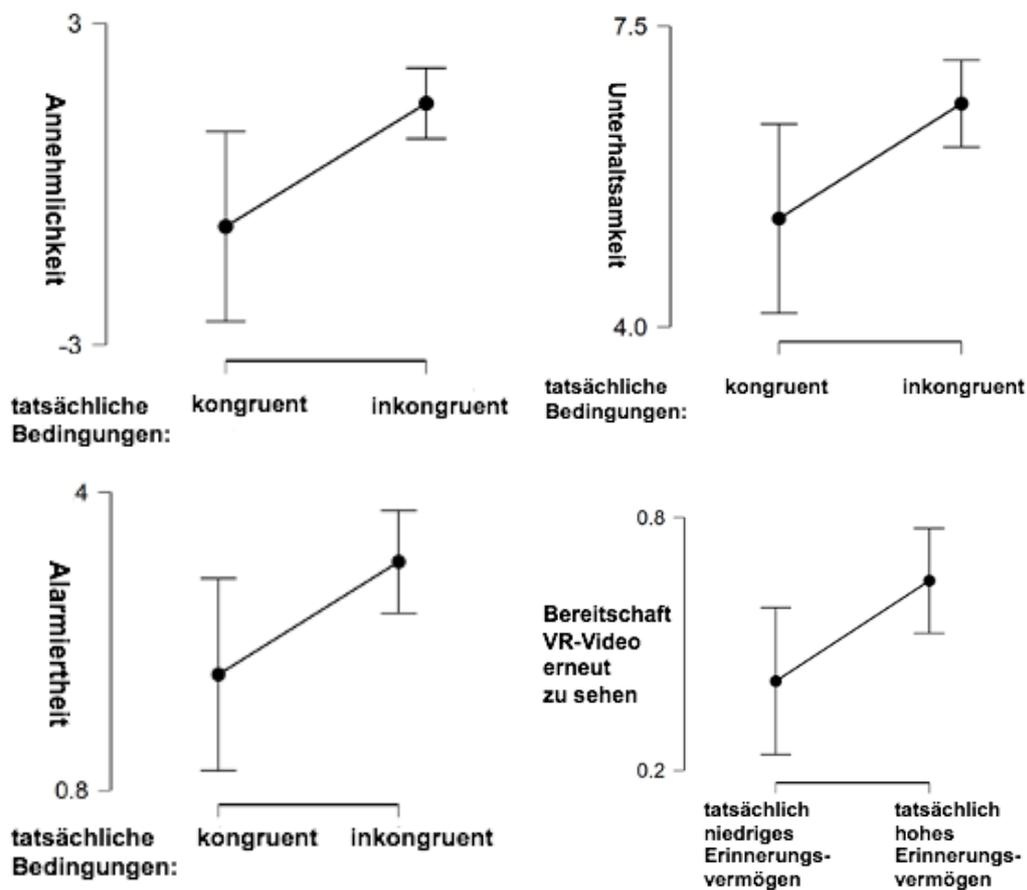


Abbildung 11: Küstenexpedition: Tatsächlich kongruente und inkongruente Bedingungen und die Auswirkung auf Annehmlichkeit (oben rechts), Unterhaltsamkeit (oben links), die Alarmiertheit (unten links) sowie die Bereitschaft das Video erneut zu schauen in Relation zu der tatsächlich besseren bzw. schlechteren Gedächtnisleistung (unten rechts).

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 12 oben links). Zu beachten ist hier, dass den Teilnehmenden kein Geruch präsentiert wurde. Außerdem ging eine bessere selbstdeklarierte Gedächtnisleistung mit einer höheren Unterhaltsamkeit ($F[1,88] = 22,3, p < .001$) (Abbildung 12 oben rechts), Aufgeregtheit ($F[1,88] = 13,76, p < .001$) (siehe Abbildung 12 unten links) sowie einer höheren Alarmiertheit einher ($F[1,88] = 7,46, p = .008$) (siehe Abbildung 12 unten rechts).

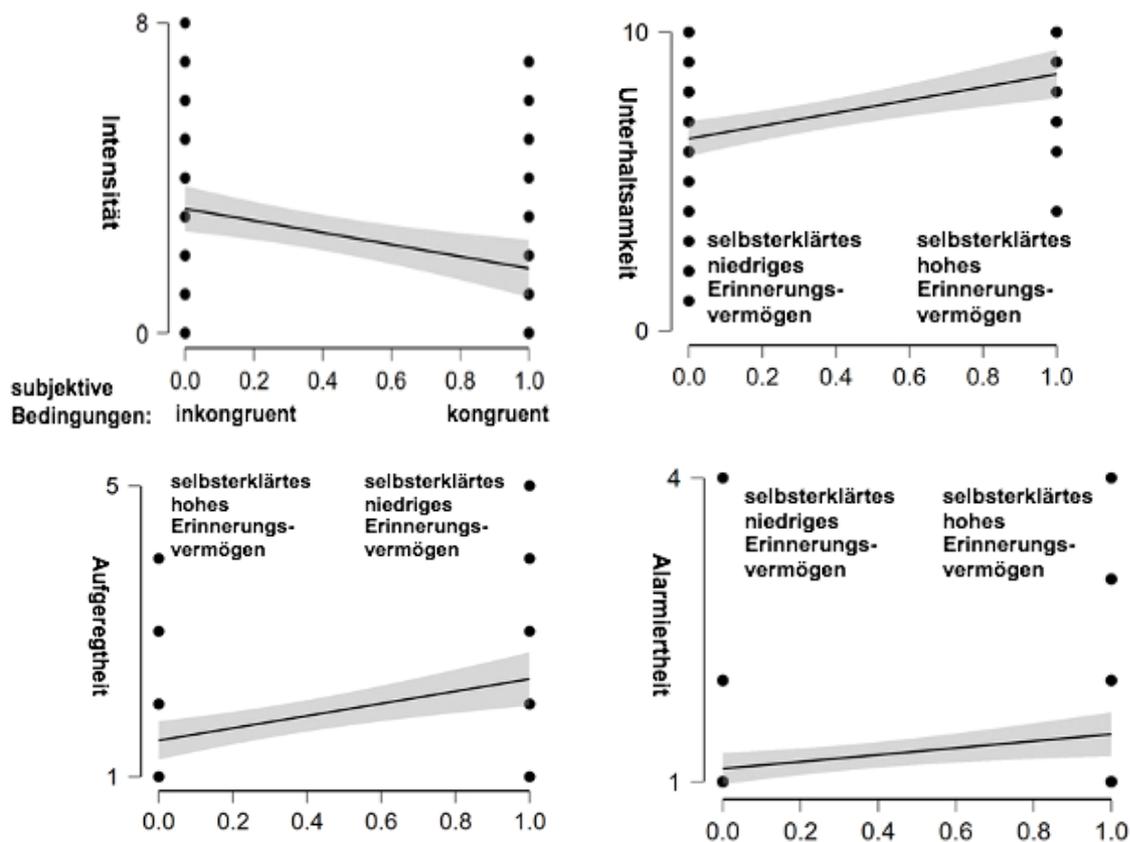


Abbildung 12: Das Sternennachts-Video: Wahrgenommene Intensität des Geruchs unter subjektiv empfundener Kongruenz, bzw. Inkongruenz (oben links). Hohes bzw. niedrigeres selbstdeklariertes Erinnerungsvermögen ($*p < .05$), ($**p < .001$) und die Auswirkung auf Aufgeregtheit (unten links), Unterhaltsamkeit (oben rechts) und Alarmiertheit (unten rechts).

Im Folgenden sind die Ergebnisse für die subjektiv wahrgenommene Kongruenz von präsentierten Gerüchen und VR-Umgebung dargestellt (siehe Tabelle 6 und Abbildung 13).

Tabelle 6: subjektiv empfundene Kongruenz separiert für die einzelnen Videos und Gerüche.

VR-Umgebung						
Als kongruent wahrgenommen						
Präsentierter Geruch	Tulpenfeld	verlorene Orte	Kaffeehaus	Küstenexpedition		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%	24%	41%	12%		29%

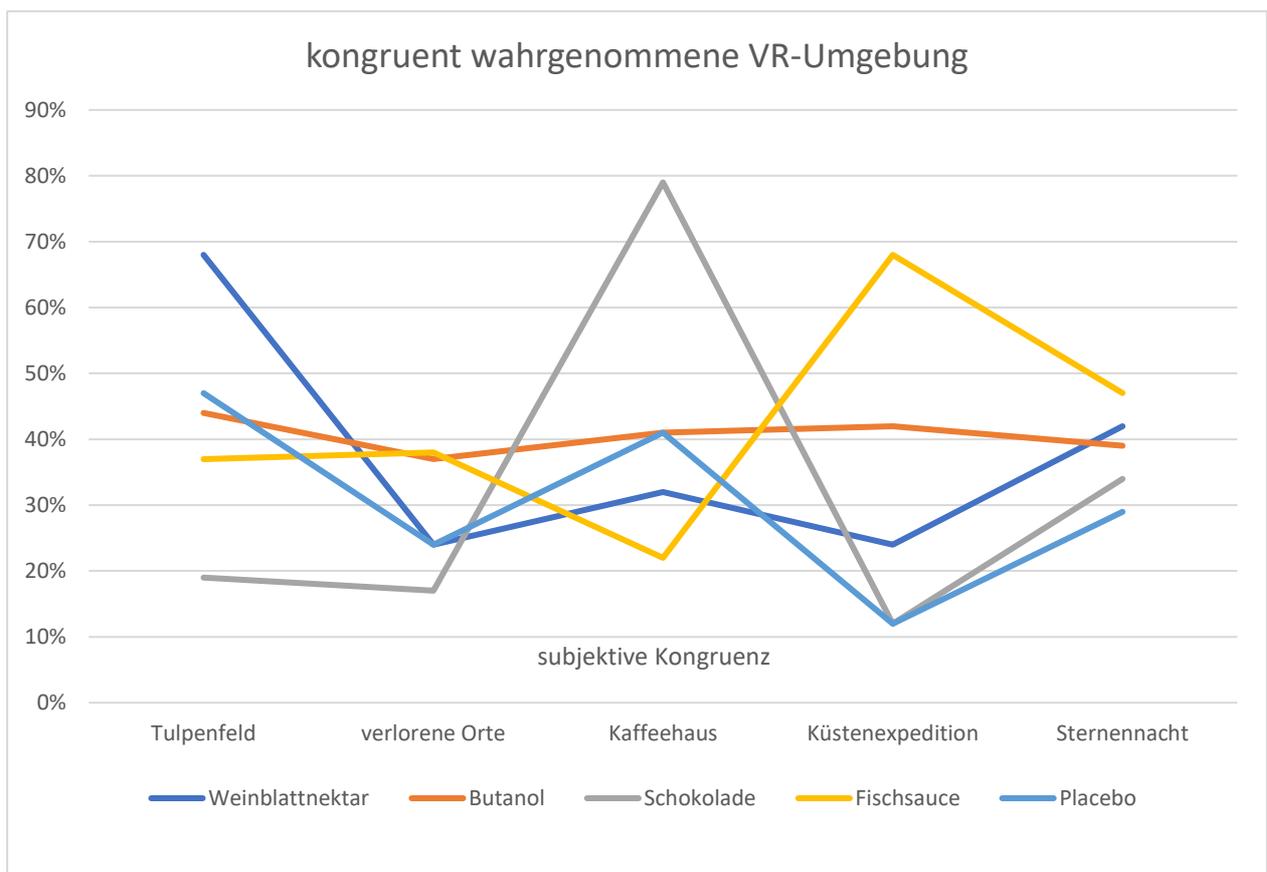


Abbildung 13: Subjektive Wahrnehmung von Kongruenz und Inkongruenz gegenüber den präsentierten Gerüchen

Tulpenfeld

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

Verlorene Orte

Am häufigsten als kongruent wahrgenommen wurde die Kontrolle (kein Geruch). Schokolade wurde am häufigsten als inkongruent wahrgenommen ($F[4,89] = 2,7$, $p = .036$; $p = .032$, Bonferroni-korrigiert).

Kaffeehaus

Mit deutlichem Abstand wurde Schokolade am häufigsten als kongruent wahrgenommen. Am wenigsten häufig wurde Fischsauce als kongruent wahrgenommen ($F[4,89] = 4,25$, $p = 003$; für Fischsauce: $p = .004$, alle Bonferroni-korrigiert).

Küstenexpedition

Laut Varianzanalyse wurde am häufigsten Fischsauce als kongruent eingeschätzt. Am seltensten als kongruent eingeschätzt wurde der Schokoladen-Geruch direkt gefolgt von dem blumigen Weinblattnektar (siehe Abbildung 21) ($F[4,89] = 4,6$, $p = .002$; für Weinblattnektar: $p = .028$, für Schokolade: $p = .004$, alle Bonferroni-korrigiert).

Sternennacht

Es konnte kein subjektiver Unterschied zwischen allen fünf Kontrollgruppen gefunden werden. Alle Gruppen bekamen einen Kontrollclip (kein Geruch) präsentiert.

6.3 Auswertung der EEG-Daten

Keines der vier Modelle zeigte einen Einfluss der Kongruenz bzw. Inkongruenz auf die Hirnfrequenzen (für alle Frequenzen: $F[1,76] = .34$, $p = .628$).

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, was dafür spricht, dass keines der Modelle gut passte: (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).

Wesentliche Ergebnisse

Es zeigte sich, dass Proband*innen unter kongruenten Bedingungen die Intensität des Tulpenvideo-Dufts (Weinblattnektar) intensiver wahrnahmen als unter inkongruenten Bedingungen.

Bei den Videos: Verlorene Orte und die Küstenexpedition konnten wir zeigen, dass die inkongruente Duftsituation zu mehr Annehmlichkeit führt.

Bei dem Video verlorene Orte zeigte sich, dass zusätzlich zur Annehmlichkeit 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. Auch waren Proband*innen mit einem höheren Erinnerungsvermögen weniger irritiert.

Die Küstenexpedition löste in der objektiv inkongruenten Situation mehr Alamiertheit aus und wurde als unterhaltsamer wahrgenommen als in der kongruenten Duftsituation. Teilnehmende mit einem höheren Erinnerungsvermögen waren eher geneigt sich das Video erneut anzuschauen.

Bei dem Kaffeehaus-Video zeigte sich, dass es unter objektiv kongruenten Bedingungen angenehmer und intensiver und unter subjektiv kongruenten Bedingungen als aufregender und vertrauter wahrgenommen wurde.

Proband*innen, mit selbsterklärtem hohem Erinnerungsniveau, die das Sternennacht-Video gesehen hatten, gaben an, dass das Video unterhaltsamer war, sowie mit einer höheren Alamiertheit einhergehe.

Zudem nahmen Teilnehmende unter subjektiv inkongruenten Bedingungen die VR-Umgebung als intensiver wahr.

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 (Abbildung 8).

Wir fanden keinen Zusammenhang zwischen Kongruenz bzw. Inkongruenz auf die Hirnfrequenzen und konnten ebenso keine spezifischen Effekte zwischen einzelne Elektroden erkennen.

7. Diskussion

Untersucht wurde, ob Proband*innen, welche die VR-Umgebungen subjektiv und objektiv als kongruenter wahrnehmen sich später detailreicher und positiver an die Umgebung erinnern. Zudem legten wir einen 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 nach spezifischen EEG-Veränderungen geschaut, die bestimmte Gerüche in VR-Umgebungen hervorrufen.

7.1 Diskussion der Ergebnisse

7.1.1 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 detailreicher und 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 und Hummel, 2011). Es zeigte sich, dass olfaktorische Reize in der Lage sind, die Hedonik einer Situation zu modulieren (Demattè et al., 2007; Locke und 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 und Hummel, 2011; Streeter und White, 1986). Diese Erkenntnisse konnten wir mit unserer Studie zumindest für die angenehmen Videos belegen. Das Tulpenfeld und das Kaffeehaus wurden in den kongruenten Duftkonstellationen, welche ebenfalls angenehm waren, positiver bewertet als in der inkongruenten Situation.

Das Tulpenfeld-Video und das Kaffeehaus-Video

Im Hinblick auf unsere 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 Annehmlichkeit 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.

Diese Ergebnisse stehen im Widerspruch zu Baus und 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.

Unsere Ergebnisse deuten darauf hin, dass sich auch kongruente angenehme Gerüche auf die Wahrnehmung in VR-Umgebungen auswirken, was wir in diesem Zusammenhang an einer größeren und somit aussagekräftigeren Stichprobe zeigen konnten.

Die Küstenexpedition und die verlorenen Orte

Es zeigte sich, entgegen der Annahme unserer 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 Annehmlichkeit. Außerdem zeigte sich, dass zusätzlich zur Annehmlichkeit 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 und 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 Annehmlichkeit 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.

Ein weiterer möglicher Erklärungsansatz könnte sein, dass unter inkongruenten 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). Bisher konnten nur Carulli und Kolleg*innen (2016) zeigen, dass auch inkongruente Düfte zu einer verbesserten und positiveren Wahrnehmung der VR-Umgebung beitragen.

Unsere Ergebnisse lassen darauf schließen, dass objektiv kongruente Bedingungen nicht unbedingt zu einer positiveren Wahrnehmung der VR führen, sondern in unserem Fall subjektiv inkongruente Wahrnehmungen zu positiveren Bewertungen der Situation führen. Hier sollten zukünftige Studien die vorliegenden Ergebnisse durch größere Stichproben 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 und 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.

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 Sternennacht

Das Sternennacht-Video zeigte, dass es 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 und 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 Annehmlichkeit des Reizes geht, sondern viel mehr um Kongruenz multisensorischer Reize (Spangenberg et al., 2005). Die vorliegenden Ergebnisse geben jedoch einen Hinweis darauf, dass die Annehmlichkeit 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.

Wir konnten zeigen, dass kongruente Bedingungen nicht ausschließlich zu einer positiveren Wahrnehmung führen. Auch nicht übereinstimmende inkongruente visuelle und olfaktorische Reize können die Annehmlichkeit 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.

7.1.2 Einfluss der Gedächtnisleistung auf Wahrnehmung der VR-Umgebung

Die zweite Hypothese besagt, dass die Teilnehmenden mit einer subjektiv erklärten und objektiv gemessenen besseren Gedächtnisleistung die VR-Umgebung positiver bewerten.

Zum jetzigen Zeitpunkt hat sich unseres Wissens nach noch keine Forschungsgruppe mit der Frage beschäftigt, ob sich eine bessere Gedächtnisleistung positiv auf die Wahrnehmung von VR-Umgebungen auswirkt.

Dass sich Gerüche auf Erinnerungen auswirken, zeigte sich bereits in früheren Studien (Herrmann et al., 2013). Diese Effekte konnten auch in einer VR-Umgebung von sowohl Dinh et al., (1999); Moore et al., (2015); als auch Tortell et al., (2007) gezeigt werden. Das Abrufen semantisch gelernter Inhalte in VR-Umgebungen wird durch olfaktorische Reize vereinfacht, wenn bei der erneuten Testung, also der Encodierung des Wissens derselbe olfaktorische Reiz bereitgestellt wurde (Tortell et al., 2007). Sabiniewicz und Kolleg*innen (2021) fanden heraus, dass kongruente bzw. inkongruente Gerüche die Wahrnehmung modulieren können, jedoch keine Auswirkungen auf das Gedächtnis bzw. Erinnerungsvermögen haben. Interessant in diesem Zusammenhang ist, dass der Faktor Immersion variable Auswirkungen auf das Gedächtnis haben kann (Smith und Mulligan, 2021).

Insgesamt lässt sich festhalten, dass Gedächtnis und Geruch in VR-Umgebungen ein bisher weitgehend unerforschtes Feld sind.

Im Folgendem sind die Ergebnisse unserer Studie zusammengefasst.

Die verlorenen Orte

Gemäß unserer zweiten Hypothese konnten wir bei dem Video der verlorenen Orte zeigen, dass Proband*innen, die sich objektiv an mehr Details erinnern, weniger irritiert waren.

Die Küstenexpedition

Bei der Küstenexpedition sagten die Teilnehmenden, die noch viel Detailwissen präsent hatten, dass sie eher dazu geneigt seien, sich den Film erneut anzuschauen, was auf eine positivere Wahrnehmung hindeutet.

Auch bei den Teilnehmenden, die eine subjektiv bessere Gedächtnisleistung hatten, konnten diese positiven Effekte auf das Gedächtnis gezeigt werden.

Die Sternennacht

Bei dem Sternennacht-Video gaben Proband*innen mit selbsterklärtem hohem Erinnerungsniveau an, dass das Video eine höhere Altmiertheit und somit auch Wachsamkeit auslöse und auch insgesamt unterhaltsamer sei. Bennett-Levy und Powell, (1980) belegten hingegen, dass die objektive Gedächtnisleistung nicht von den selbstdeklarierten Gedächtnisfähigkeiten beeinflusst wird.

Zusammenfassend konnten wir zeigen, dass sowohl ein subjektiv als auch ein objektiv hohes Erinnerungsniveau die Wahrnehmung in der virtuellen Realität beeinflusst. Diese Ergebnisse sollten an einer größeren Stichprobe verifiziert werden.

7.1.3 Spezifische EEG-Veränderungen in VR-Umgebungen

Unsere dritte These lautete, dass durch bestimmte Düfte spezifische EEG-Muster hervorgerufen werden.

Entgegen unserer These konnten wir keinen Einfluss von Kongruenz bzw. Inkongruenz auf die Hirnfrequenzen sichtbar machen.

Schon Di Flumeri et al. (2016) zeigten, dass die Wahrnehmung von Gerüchen zu Frequenzbandveränderungen im Alphaband führte. Zudem fanden sie Hinweise, dass man anhand der spezifischen Muster ablesen könne, ob ein Geruch als angenehm bzw. unangenehm wahrgenommen würde.

In einer neueren Studie fanden sich während der Verabreichung von Düften außerdem Veränderungen der Theta-Oszillationen auf Ebene des piriformen Cortex (Jiang et al., 2017). 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 und Kolleg*innen (2021), fanden auch in VR-Umgebungen spezifische Effekte während der Verabreichung von Duftstoffen im EEG. Das abgeleitete EEG ließ 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. Die selbstangegebene Annehmlichkeit ergab jedoch zwischen den beiden Bedingungen keinen Unterschied.

In unserer Studie konnten wir überdies keine Unterschiede zwischen einzelnen Ableitungspositionen feststellen. Alle erhaltenen AICs waren hoch mit minimalen Unterschieden zwischen ihnen. Dies zeigt, dass das gewählte Linear Mixed Model nicht gut passte. Ebenso ist anzunehmen, dass die EEGs einer zu großen Varianz unterlagen und ein schlechtes Signal-Rausch-Verhältnis dazu führte, dass keine signifikanten Ergebnisse generiert werden konnten.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass eine EEG-Interpretation nach olfaktorischer Stimulation noch viele Ungewissheiten birgt.

Von Interesse für weitere Untersuchungen wäre, ob angenehme bzw. unangenehme Gerüche unterschiedliche EEG-Aktivierungen in VR-Umgebungen zeigen und ob Kongruenz bzw. Inkongruenz eine Rolle spielt.

7.2 Diskussion der Methoden

Abhängigkeit der Ergebnisse von Anzahl, Alter und Geschlecht

Die Studie schloss 100 Proband*innen ein. Wir entschieden uns im Vorhinein für gesunde Proband*innen ohne Vorerkrankungen. 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.

Somit weist diese Studie keine Repräsentativität für die Allgemeinbevölkerung auf. 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). Überdies ist auch für unsere Studie interessant, dass Frauen eine höhere Fähigkeit der emotionalen Verknüpfung von Gedächtnis und Geruchsreizen zeigen, so sind Geruchserinnerungen besser ausgeprägt (Herz und Cupchik, 1992; Koelega und Köster, 1974).

Ein weiterer Unterschied findet sich in der unterschiedlichen Physis. 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 und Millot, 2001; Dalton et al., 2002).

Zusätzlich zu den hormonellen Unterschieden gibt es auch anatomische Charakteristika. So haben Frauen in der Regel kleinere Nasen, was zu weniger Luftstrom und somit weniger Luftvolumen an der Riechschleimhaut führt (Hornung und Leopold, 1999). Das führt zu einer erhöhten Konzentration von Duftmolekülen, was die verbesserte Riechfähigkeit partiell erklären kann.

Auch konnte im fMRT gezeigt werden, dass andere kortikale Bereiche verstärkt aktiviert werden. So fand man bei Frauen vor allem im unteren Temporallappen eine stärkere Aktivierung (Yousem et al., 1999).

Ein entwicklungsbiologischer Ansatz für die Erklärung des unterschiedlichen Riechvermögens ist, dass Frauen evolutionär andere Fähigkeiten brauchten, um ausreichend Nahrung zu finden. So war die Geruchs- und Geschmacksentwicklung bzw. die Fähigkeit, unterschiedliche Pflanzen und andere mögliche Nahrungsmittel zu unterscheiden, von höherer Wichtigkeit als bei den meist männlichen Jägern.

Für eine Evaluierung der Ergebnisse sowie eine höhere Relevanz der Studie empfiehlt es sich, die Studie erneut mit einem größeren, repräsentativen und geschlechtergleichverteilten Patientenkollektiv durchzuführen.

7.3 Limitationen und Herausforderungen

Im Folgenden sollen einige Einschränkungen der Studie erörtert werden:

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 unserer 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.

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). Wir nutzten für die Verabreichung des Dufts Nasenclips, 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).

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).

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 kulturelle, geschlechtsspezifische, altersabhängige, aber auch biographisch bedingte Unterschiede in der Geruchswahrnehmung und Bewertung können eine Herausforderung bei

der Standardisierung von Experimentalbedingungen darstellen. (Ghinea und Ademoye, 2011; Good und 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).

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).

8. 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. So ist die virtuelle Realität zum Beispiel ein essenzieller Bestandteil bei der Behandlung traumatisierter Menschen. 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. Bisher sind Kongruenz und Gedächtnisleistung in VR nur unvollständig verstanden. Ziel war es, Effekte von Kongruenz und Inkongruenz sowie subjektiv und objektiv eingeschätztes Erinnerungsvermögen auf die Wahrnehmung der VR zu untersuchen, um so ein besseres Verständnis zu ermöglichen. Des Weiteren wurde analysiert, ob sich bestimmte EEG-Veränderungen während der Untersuchung messen lassen.

Methoden: Es wurden insgesamt 100 Teilnehmende hinsichtlich ihrer Angaben zur Annehmlichkeit und zum Erinnerungsvermögen nach Stimulation durch kongruente bzw. inkongruente Düfte während einer VR-Umgebung verglichen. Die Experimentalgruppe umfasste 20 Teilnehmende und die Kontrollgruppe 80 Proband*innen. Gleichzeitig wurde ein 64-Kanal-EEG abgeleitet. 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.

Ergebnis: Es zeigte sich, dass kongruente Bedingungen die Wahrnehmung nicht zwangsläufig immer positiv beeinflussen. So konnte gezeigt werden, dass die unangenehmen Videos, Küstenexpedition und verlorene Orte, in der inkongruenten Bedingung als angenehmer empfunden wurden. Auch fanden sich Hinweise, dass die subjektive Kongruenz zwischen Geruch und Video einen stärkeren Einfluss auf die Hedonik der Wahrnehmung hat als die objektive Kongruenz. Zudem wiesen die Ergebnisse darauf hin, dass sowohl die subjektiv als auch die objektiv erklärte Gedächtnisleistung einen Einfluss auf die Wahrnehmung von VR-Umgebungen hat.

Auf Grund von zu großer Varianz sowie eines ungünstigen Signal-Rausch-Verhältnis konnten keine EEG-Veränderungen gefunden werden.

Schlussfolgerung: Unsere Annahme, dass Kongruenz bzw. Inkongruenz und die subjektive bzw. die objektive Gedächtnisleistung die Wahrnehmung beeinflussen, bestätigte sich.

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 evtl. auch andere Untersuchungs- und Messmethoden notwendig.

8. Summary

Background: We experience reality through the stimulation of our five senses. In recent decades, virtual reality has also become increasingly important. Virtual reality is an essential component in leisure time gaming, in industry, but also in learning new processes or skills, as well as in the medical field, for example in the treatment of traumatized people. In order to achieve the best possible effects, it is necessary to have a realistic experience and perception. Until now, the improvement of VR has been limited primarily to visual perception, but it has been understood that the most realistic perception possible requires above all multimodal neuronal activation, which arises in particular through multisensory experience. So far, congruence and memory performance in VR are only not completely understood. The aim was to investigate effects of congruence and incongruence, as well as subjectively and objectively assessed memory, on the perception of VR and thus to facilitate a better understanding. Furthermore, it was analysed whether certain EEG changes could be measured during the examination.

Methods: A total of 100 participants were compared on their ratings of pleasantness and recall after stimulation by congruent or incongruent scents during a VR-Environment. The experimental group consisted of 20 participants and the control group of 80 subjects. At the same time, a 64-Channel-EEG was recorded. Olfactory ability was assessed using a three-component identification test, the Sniffin' Sticks. Cognition was assessed using the MoCA and affect was measured using the PANAS scale.

Results: We found that congruent conditions do not necessarily always positively influence cognition. Thus, it could be shown that the unpleasant videos, Coast expedition and lost Places were perceived as more pleasant in the incongruent condition. Evidence was also found that subjective congruence between smell and video had a stronger influence on perceptual hedonics than objective congruence. We also found that both subjectively and objectively explained memory levels had an influence on VR-Environment perception.

Due to too much variance together with an unfavorable signal-to-noise ratio, we could not find any EEG changes.

Conclusion: Our assumption that congruence or incongruence and subjective or objective memory level influence perception was confirmed. This study raises further questions, as the results contradict some previous studies. For a deeper and better understanding of perception

in VR-Environments, further broader studies and possibly other research and measurement methods are needed.

9. Literaturverzeichnis

- Auvray, M., & Spence, C. (2008). The multisensory perception of flavor. *Consciousness and cognition*, *17*, 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*. <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>
- Bennett-Levy, J., & Powell, G. E. (1980). The Subjective Memory Questionnaire (SMQ): An investigation into the self-reporting of „real-life“ memory skills. *British Journal of Social & Clinical Psychology*, *19*(2), 177–188. <https://doi.org/10.1111/j.2044-8260.1980.tb00946.x>
- 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.
- Carulli, M., Bordegoni, M., & Cugini, U. (2016). Integrating Scents Simulation in Virtual Reality Multisensory Environment for Industrial Products Evaluation. *Computer-Aided Design and Applications*, *13*(3), 320–328. <https://doi.org/10.1080/16864360.2015.1114390>

- 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., Frisén, 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, R. (2007). *Handbook of psychophysiology* (J. Cacioppo, L. Tassinary, & G. Berntson, Hrsg.). <https://doi.org/10.13140/2.1.2871.1369>
- 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, A., Moneta, E., Peperario, M., & Babiloni, F. (2016). *EEG Frontal Asymmetry Related to Pleasantness of Olfactory Stimuli in Young Subjects*. 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*. (1. Auflage). Tectum Wissenschaftsverlag.
- 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. In W. Möhring & D. Schlütz (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 et al. (2014). Functional Anatomy of the Olfactory System II: Central Relays, Pathways, and their Function. In *Management of Smell and Taste Disorders* (2014). 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*. 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/s11042-010-05814>
- 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>
- Heilig, M. L. (1962). *Sensorama simulator* (United States Patent Nr. US3050870A). <https://patents.google.com/patent/US3050870A/en>
- 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*. <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>
- Hoffmann, R., & Wolff, M. (1999). *Intelligente Signalverarbeitung 1*. Springer. DOI: 10.1007/978-3-662-45323-0
- 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, J. & Walter, K. (2005). *Kurzlehrbuch Physiologie (4 Auflage)*. Thieme. doi:10.1055/b-002-96275
- 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>
- Kaye, J. „Jofish“. (2004). Making Scents: Aromatic output for HCl. *Interactions*, *11*(1), 48–61. <https://doi.org/10.1145/962342.964333>
- Kim, S. M. (2016). Psychophysiological effects of orchid and rose fragrances on humans. *Horticultural Science and Technology*. 2016 Vol.34(3). <https://doi.org/10.12972/kjhst.20160048>
- 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>

- 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*. <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., & 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. (2003). *Taschenlehrbuch Histologie. 6. Auflage. Thieme.* doi:10.1055/b-006-163361
- Lundström, J., Boesveldt, S., Albrecht, J. . (2010). *Central Processing of the Chemical Senses: An Overview.* ACS Chemical Neuroscience 2(1),5-16.
doi: 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, 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., & Mulla, J. (2018). Olfactory Dysfunction in Neurodegenerative Diseases. *Current Allergy and Asthma Reports*, 18(8), 42. <https://doi.org/10.1007/s11882-018-0796-4>
- 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), 1–11. <https://doi.org/10.1038/s41398-021-01739-3>
- 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).
<https://doi.org/10.1115/1.4043068>
- Moncreiff, R. W. (1962). Effect of odours on EEG records. *Perfum. Essent. Oil Rec.* (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>
- 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>
- 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)
- 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>
- 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, Waterworth. (2003). *Presence and the Self: A cognitive neuroscience approach*. Present-connects, 3(3)

- 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>
- Sabiniewicz, A., Schaefer, E., Guducu, C., Manesse, C., Bensafi, M., Krasteva, N., Nelles, G., & Hummel, T. (2021). Smells Influence Perceived Pleasantness but Not Memorization of a Visual Virtual Environment. *i-Perception*, 12, 204166952198973. <https://doi.org/10.1177/2041669521989731>
- 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>
- 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., Luckett, 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 and Virtual Environments*, (1997) 6(6), 603–616. <https://doi.org/10.1162/pres.1997.6.6.603>
- 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*, 0.
<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>
- 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>
- 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>
- 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>

- Wilson, D. A., & Stevenson, R. J. (2003). The fundamental role of memory in olfactory perception. *Trends in Neurosciences*, 26(5), 243–247. [https://doi.org/10.1016/S0166-2236\(03\)00076-6](https://doi.org/10.1016/S0166-2236(03)00076-6)
- Witte, O. W., Hagemann, G., & Haueisen, J. (2006). (o. J.). *Physiologische Grundlagen des EEG. EEG (S. 1–9)*. Georg Thieme Verlag. In A. Ebner & G. Deuschl (Hrsg.), Georg Thieme Verlag.
- Yingling, Pfurtscheller, Buser, Lopez da Silva . Petsche. (1980). *Rhythmic EEG Activities and Cortical Functioning*. Elsevier. DOI:10.1016/0301-0511(82)90022-9
- Yousem, D. M., Maldjian, J. A., Siddiqi, F., Hummel, T., Alsop, D. C., Geckle, R. J., Bilker, W. B., & Doty, R. L. (1999). Gender effects on odor-stimulated functional magnetic resonance imaging. *Brain Research*, 818(2), 480–487. [https://doi.org/10.1016/s0006-8993\(98\)01276-1](https://doi.org/10.1016/s0006-8993(98)01276-1)
- Zschoke, S. & Hansen, H.(Hrsg.) (2012). *Klinische Elektroenzephalographie (3. Auflage)*. Springer.

10. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: die zentrale Verarbeitung olfaktorischer Sinneseindrücke.	8
Abbildung 2: Ablauf des Versuchs	14
Abbildung 3: Sniffin' Sticks Identifikationstest	16
Abbildung 4: Videos die den Proband*innen vorgespielt worden	19
Abbildung 5: Auswahl der jeweiligen Duftstoffe	21
Abbildung 6: Probandin während des Versuchs	23
Abbildung 7: Darstellung der individuellen Bedingungen	27
Abbildung 8: Auswertung: Tulpenfeld	31
Abbildung 9: Auswertung: Verlorene Orte	32
Abbildung 10: Auswertung: Kaffeehaus	33
Abbildung 11: Auswertung: Küstenexpedition	34
Abbildung 12: Auswertung: Das Sternennachts-Video	35
Abbildung 13: Auswertung: Subjektive Wahrnehmung von Kongruenz und Inkongruenz	36

11. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Drei-Komponenten-Identifikationstest Sniffin' Stick	16
Tabelle 2: Einteilung der Gruppen mit entsprechenden präsentierten Gerüchen	22
Tabelle 3: Fragen zu den einzelnen Videos	24
Tabelle 4: Ausgewählte Fragen zur Auswertung des Erinnerungsvermögens	26
Tabelle 5: Altersverteilung der Proband*innen	30
Tabelle 6: subjektiv empfundene Kongruenz separiert für Videos und Gerüche	36

12. Anhang

Ergebnisse der Kovarianzanalyse für die einzelnen Videos:

Tulpenfeld (siehe Abbildung 8)

Verlorene Orte (siehe Abbildung 9)

Kaffeehaus (siehe Abbildung 10)

Küstenexpedition (siehe Abbildung 11)

Die Sternennacht (siehe Abbildung 12)

	TULPENFELD	tatsächliche kongruente vs. inkongruente Bedingung	subjektiv kongruente vs. inkongruente Bedingung	subjektiv erklärtes Erinnerungsvermögen
Annehmlichkeit	F	3.287	Okt 28	1.981
	p	0.073	0.002	0.163
Intensität	F	06. Aug	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	01. Jul	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	Feb 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.

	verlorene Orte	tatsächliche kongruente vs. inkongruente Bedingung	tatsächliches Erinnerungsvermögen	subjektiv kongruente vs. inkongruente Bedingung	subjektiv
					erklärtes Erinnerungsvermögen
Annehmlichkeit	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	Feb 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

	Kaffeehaus	tatsächliche kongruente vs. inkongruente Bedingung	tatsächliches Erinnerungsvermögen	subjektiv kongruente vs. inkongruente Bedingung	subjektiv erklärtes Erinnerungsvermögen
Annehmlichkeit	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

	Küstenexpedition	tatsächliche kongruente vs. inkongruente Bedingung	tatsächliches Erinnerungsvermögen	subjektiv kongruente vs. inkongruente Bedingung	subjektiv erklärtes Erinnerungsvermögen
Annehmlichkeit	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	Jun 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

	Die Sternennacht	tatsächliche kongruente vs. inkongruente Bedingung	tatsächliches Erinnerungsvermögen	subjektiv kongruente vs. inkongruente Bedingung	subjektiv erklärtes Erinnerungsvermögen
Annehmlichkeit	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.