

**Aus der Neurologischen Universitätsklinik Tübingen
Abteilung Kognitive Neurologie**

**Altersabhängigkeit kognitiver und metakognitiver
visueller Wahrnehmungsprozesse**

**Inaugural-Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Medizin**

**der Medizinischen Fakultät
der Eberhard Karls Universität
zu Tübingen**

vorgelegt von

Eitler-Klenk geb. Eitler, Hanna Christine

2017

Dekan: Professor Dr. I. B. Autenrieth
1. Berichterstatter: Professor Dr. T. Haarmeier
2. Berichterstatter: Professor Dr. H. Wilhelm
Tag der Disputation: 05.10.2017

Für Tobias

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	6
1.1 Demografischer Wandel und seine Herausforderungen	6
1.2 Alltagsrelevanz und physiologisches Altern visueller Wahrnehmungsfähigkeiten	7
1.3 Neuronale Verarbeitung visueller Information	8
1.4 Sehentscheidung und Entscheidungssicherheit	9
1.5 Metakognition – Bedeutung und Darstellung	11
1.6 Konkrete Fragestellung und Zielsetzung der Studie	14
2. Material und Methoden	16
2.1 Versuchspersonen	16
2.2 Technischer Aufbau	18
2.2.1 Versuchsanordnung	18
2.2.2 Aufzeichnung der Augenbewegung	18
2.2.3 Visuelle Stimulation	19
2.2.3.1 Experiment zur räumlichen Aufmerksamkeit	21
2.2.3.2 Experiment zur merkmalsbasierten Aufmerksamkeit	25
2.3 Statistische Auswertung der psychophysischen Daten	28
3. Ergebnisse	33
3.1 Experiment zur räumlichen Aufmerksamkeit mit Erfassung der perzeptuellen Entscheidungssicherheit	33
3.1.1 Objektive Diskriminationsfähigkeit der globalen Bewegungsrichtung	34
3.1.2 Perzeptuelle, subjektive Entscheidungssicherheit	41
3.1.3 Metakognitive Sensitivität	48
3.1.4 Augenpositionsdaten	56
3.2 Experiment zur merkmalsbasierten Aufmerksamkeit	57
3.2.1 Objektive Diskriminationsfähigkeit der globalen Bewegungsrichtung	57
3.2.2 Augenpositionsdaten	61
3.3 Vergleich des Aufmerksamkeitseffekts räumlicher und merkmalsbasierter Aufmerksamkeit	62
4. Diskussion	65
4.1 Diskussion der Verhaltensdaten im Experiment zur räumlichen Aufmerksamkeit	65

4.1.1 Diskriminationsleistung	66
4.1.2 Perzeptuelle Entscheidungssicherheit	70
4.1.3 Metakognitive Sensitivität	72
4.2 Diskussion der Augenbewegungsdaten im Experiment zur räumlichen Aufmerksamkeit	78
4.3 Diskussion der Verhaltensdaten im Experiment zur merkmalsbasierten Aufmerksamkeit	78
4.4 Diskussion der Augenbewegungsdaten im Experiment zur merkmalsbasierten Aufmerksamkeit	80
4.5 Diskussion des Aufmerksamkeitseffekts für räumliche und merkmalsbasierte Aufmerksamkeit im Vergleich	80
5. Zusammenfassung	82
6. Verzeichnisse	84
6.1 Abbildungs- und Tabellenverzeichnis	84
6.2 Literaturverzeichnis	86
7. Anhang	94
7.1 Erklärung zum Eigenanteil	94
7.2 Danksagung	95

1. Einleitung

1.1 Demografischer Wandel und seine Herausforderungen

Die Weltbevölkerung, insbesondere in der westlichen Welt, altert stetig. Zu keinem Zeitpunkt in der Vergangenheit war der Alterungsprozess der Gesellschaft so rasant wie aktuell [1]. Dem Statistischen Bundesamt zufolge wird im Jahr 2060 ein Drittel der Deutschen das 65. Lebensjahr überschritten haben, ein Siebtel das 80. [2]. Somit wird auch die Prävalenz altersassoziierter Erkrankungen kontinuierlich zunehmen. Beispielhaft sei hier eine Schätzung der Weltgesundheitsorganisation aus dem Jahr 2014 aufgeführt, die davon ausgeht, dass sich die Anzahl Demenzkranker weltweit von aktuell ca. 55 Millionen auf 135 Millionen im Jahr 2050 verdreifachen wird [3]. Diese Entwicklung stellt eine wachsende Herausforderung für moderne Gesellschaften dar, vor allem für soziale Sicherungssysteme und die Gesundheitspolitik: Die Zahl der Erwerbsfähigen wird zurückgehen, die Belastung sozialer Sicherungssysteme steigen, die Renten sinken. Eine der Hauptherausforderungen an unsere Gesellschaft, sowohl zur Entlastung des Gesundheitssystems, als auch zur Verbesserung und zum Erhalt der Lebensqualität eines wachsenden Bevölkerungsanteils, wird in Zukunft die Integration älterer Menschen sein. Zudem wird die Reintegration Betroffener mit altersassozierten Erkrankungen an Bedeutung gewinnen, wie beispielsweise von Patienten nach zerebralen Durchblutungsstörungen und mit neurodegenerativen Erkrankungen. Um dies zu ermöglichen, besteht zum aktuellen Zeitpunkt – nicht zuletzt aus sozioökonomischer Sicht – die Notwendigkeit, etablierte Rehabilitationsmaßnahmen effektiver zu gestalten [4] und das Rehabilitationspotenzial zu steigern. Grundvoraussetzung für die Entwicklung effektiverer, neuer Rehabilitationsstrategien ist das bessere Verständnis physiologischer Alterungsprozesse: Welche funktionellen Systeme verändern sich im Rahmen des normalen Alterns und in welcher Art und Weise? Gibt es Möglichkeiten, durch Altern erworbene Defizite durch bewussten Einsatz anderer Ressourcen zumindest teilweise zu kompensieren?

1.2 Alltagsrelevanz und physiologisches Altern visueller Wahrnehmungsfähigkeiten

Wiederholt konnte gezeigt werden, dass neben motorischen Einschränkungen insbesondere Sehstörungen Patienten mit neurologischen Erkrankungen am stärksten in ihrer Alltagsfähigkeit und in ihrer Lebensqualität einschränken [5-8]. Die Gründe hierfür sind vielfältig: Die Fähigkeit zu sehen ermöglicht es uns wie kaum eine andere Sinnesmodalität, durch unsere Umwelt zu navigieren und mit ihr zu interagieren. Alltägliche Aktivitäten wie sich anzukleiden, einen Rollstuhl zu steuern, zu lesen oder andere Medien zu nutzen, werden durch Einschränkungen der visuellen Wahrnehmung deutlich erschwert. Nicht zuletzt stellt visuelle Wahrnehmung eine der Hauptquellen des Gedächtnisses dar [9]. Gerade in Bezug auf das visuelle System besteht ein gesteigerter Bedarf zielführender Rehabilitation, da insbesondere hier auch nach erfolgten Rehabilitationsmaßnahmen ein Wiedererlangen defizitärer Funktionen nur unbefriedigend gelingt, sondern in hohem Maße auf kompensatorische Mechanismen zurückgegriffen werden muss [10].

Zahlreiche Studien haben verschiedene Defizite des alternden visuellen Systems beschrieben. Eine kontinuierliche Verschlechterung verschiedener höherer visueller Funktionen ist als normal anzunehmen. Dazu gehören: Orientierung [11], Kontrastempfindlichkeit [12], visuelle Aufmerksamkeit [13] sowie Bewegungswahrnehmung [14]. Während strukturelle Defekte im Bereich des primär visuellen Kortex und der Sehbahn zum gut untersuchten Symptom des homonymen Gesichtsfeldausfalls führen, sind Läsionen übergeordneter Zentren, z. B. des visuellen Assoziationskortex, weniger gut verstanden. Störungen in diesen Zentren bringen Einschränkungen höherer kognitiver visueller Funktionen wie die oben genannten sowie des Farbensehens, des visuellen Kurzzeitgedächtnisses und der Objekterkennung mit sich [15]. Diese funktionellen Einbußen im Laufe eines Lebens können nicht auf Veränderungen in einem einzelnen System oder einem bestimmten anatomischen Substrat zurückgeführt werden. So spielen neben retinalen Alterseffekten, wie der Degeneration von Fotorezepto-

ren und Ganglienzellen, auch Alterungsprozesse im Bereich des optischen Apparates und höherer kortikaler neuronaler Strukturen eine Rolle [16, 17].

In Experimenten an Katzen [18] und Affen [19, 20] konnte beispielhaft gezeigt werden, dass diese Veränderungen zumindest teilweise auch auf eine altersabhängige Änderung des charakteristischen Verhaltens visueller Neurone wie Spontanaktivität und Ausprägung der Richtungsselektivität zurückzuführen sind. Studien mit funktioneller Bildgebung am Menschen zeigen außerdem eine altersabhängige Abnahme der okzipitotemporalen Aktivität zugunsten einer Zunahme frontaler Aktivität mit dem Alter, auch als Posterior-Anterior-Shift bezeichnet. Der Posterior-Anterior-Shift konnte für eine Vielzahl kognitiver Funktionen gefunden werden. Dazu gehören u. a. Aufmerksamkeit [21], visuelle Wahrnehmung [22] und das Arbeitsgedächtnis [23]. 2008 konnte mittels funktioneller Magnetresonanztomografie außerdem gezeigt werden, dass die Aktivität im präfrontalen Kortex, bzw. das Ausmaß des Shifts, positiv mit der Leistung der Probanden in zwei unterschiedlichen kognitiven Aufgaben korreliert [24]. Hieraus wurde geschlossen, dass eine Zunahme der frontalen Aktivität einen Kompensationsmechanismus darstelle für die Abnahme der okzipitalen Aktivität, die mit dem Verlust sensorischer Fähigkeiten im Alter einhergehe. Diese Erkenntnisse deuten darauf hin, dass im Alter kognitive Mechanismen wie Aufmerksamkeit, Gedächtnis oder Motivation nachlassende Wahrnehmungsleistungen kompensieren könnten, um die perzeptuelle Leistungsfähigkeit aufrechtzuerhalten.

1.3 Neuronale Verarbeitung visueller Information

Visuelle Informationen aus unserer Umwelt erreichen uns zunächst über die ca. 125 Millionen Lichtsinneszellen der Retina, welche auf etwa eine Million Ganglienzellen konvergieren, deren Axone sich zu den beiden Nervi optici vereinen. Nach Verschaltung im Corpus geniculatum laterale des Zwischenhirns erfolgt die Weiterleitung der visuellen Information über die retinotop gegliederte Sehstrahlung (Radiatio optica) zum primär visuellen Kortex (V1) am Okzipitalpol, wo

eine Verarbeitung jeweils homonymer Afferenzen des kontralateralen Gesichtsfeldes erfolgt. Auf dem Weg dorthin erfahren die primär eingegangenen Informationen bereits zahlreiche Modifikationen durch verschiedene subkortikal gelegene Zentren, wie den Colliculus superior, die Basalganglien, das Putamen und das Corpus geniculatum laterale. Vom primär visuellen Kortex ausgehend erfolgt die weitere Verarbeitung über zwei räumlich weitgehend getrennte Pfade, welche schon in der Retina und im Corpus geniculatum laterale differenziert werden können: Über den parvozellulären Pfad (= ventrale Bahn oder „Was-System“) erfolgt die Weiterleitung von Informationen, die für die Wahrnehmung von Objekteigenschaften wichtig sind, wie Farbe, Kontraste und Strukturdetails. Diese Informationen dienen der Objekterkennung wie beispielsweise dem Unterscheiden individueller Gesichter, Funktionen, die dem inferioren Temporalkortex zugesprochen werden, in welchen hinein die parvozelluläre Bahn besonders stark projiziert. Komplementär entsendet der magnozelluläre Pfad (= dorsale Bahn oder „Wo-System“) Informationen über Bewegung und über den Raum zum parietalen Kortex. Somit werden in unterscheidbaren, spezialisierten kortikalen Zentren bestimmte Unter Aspekte visueller Wahrnehmung, wie beispielsweise Farbe, Form oder Bewegung [25] verarbeitet. Andererseits integrieren übergeordnete Areale Informationen bzw. Afferenzen aus diesen Zentren. Insgesamt ist das Verarbeitungssystem visueller Informationen außerordentlich verzweigt und umfasst mehr als 30 unterschiedliche Verarbeitungsareale, welche direkt oder indirekt miteinander in Verbindung stehen [26, 27]. Es liegt daher nahe, dass Defizite der visuellen Wahrnehmung zu den häufigsten Defiziten überhaupt gehören, die im Rahmen zerebrovaskulärer und neurodegenerativer Erkrankungen vorkommen [28].

1.4 Sehentscheidung und Entscheidungssicherheit

Zu verstehen, wie das menschliche Gehirn sensorische Informationen in sinnvolle Repräsentationen und schließlich Wahrnehmungen übersetzt, stellt hohe Anforderungen nicht nur an das praktische Experimentieren, sondern genauso an die Theoriebildung [29]. Um Wahrnehmungsprozesse unterschiedlichster

Modalitäten mathematisch und statistisch fassbar zu machen, werden diese häufig als Entscheidungsprozesse beschrieben. Diese Entscheidungsprozesse können grundsätzlich auf Grundlage statistischer Abwägungen getroffen werden, um die große Menge verrauschter, wenig zuverlässiger Informationen, die uns über das Sensorium erreichen, optimal einordnen zu können und in eine neue Kategorie zu übersetzen [30].

Visuelle Wahrnehmungsprozesse können sehr gut nach dem Prinzip bedingter Wahrscheinlichkeiten, wie es von Bayes etabliert wurde, beschrieben werden. Diese Formalisierung geht davon aus, dass durch Kombination bereits erworbener Kenntnisse, z. B. auf Basis früherer Wahrnehmungen und Entscheidungen, mit neuen Wahrnehmungseindrücken eine probabilistische Bewertung der aktuellen Wahrnehmung erfolgt, um das daraus resultierende Verhalten optimieren zu können [31]. Mit anderen Worten wird visuelle Wahrnehmung als Inferenzprozess aufgefasst, welcher eingehende, oft vieldeutige sensorische Informationen mit bestehendem Wissen abgleicht und verknüpft und so die Wahrnehmung in einer Art und Weise interpretiert, die als am ehesten wahrscheinlich eingestuft wird [29, 32].

Ein spezifischer Bestandteil Bayes'scher Entscheidungsmodelle ist die Entscheidungssicherheit. In diesem Zusammenhang wurde der Begriff des „degree of belief“ geprägt, also der subjektiven Einschätzung des Entscheidenden über die Zuverlässigkeit bzw. Korrektheit einer von ihm getroffenen Entscheidung. Diese Einschätzung erfordert eine metakognitive Reflexion der eigenen erbrachten Leistung und die Zuordnung eines Überzeugungsgrades über Richtigkeit oder Falschheit der eigenen getroffenen Entscheidung [33]. Diese perzeptuelle Entscheidungssicherheit kann als Wahrscheinlichkeitseinschätzung begriffen werden, welche im gegebenen Kontext, oft voller ablenkender Störreize, einer getroffenen Entscheidung oder Wahrnehmung eine subjektive Sicherheitseinschätzung zuordnet [34], indem sie auf vorausgegangene Erfahrungswerte zurückgreift und so auf das wahrscheinlichste Resultat rückschließt [35, 36]. Mit anderen Worten, die Entscheidungssicherheit ist das metakognitive Korrelat der Bayes'schen Verbundwahrscheinlichkeit.

2009 konnten Kiani und Shadlen in einer Studie mit Rhesusaffen zeigen, wie ähnlich implementiert perzeptuelle Entscheidungssicherheit und die zugrunde liegende Wahrnehmungsentscheidung tatsächlich sind [35]: Im lateralen parietalen Kortex kodieren Neurone durch ihr spezifisches Entladungsmuster nicht nur die sensorischen Informationen, die der perzeptuellen Entscheidung in der visuellen Diskriminationssaufgabe zugrunde liegen, sondern gleichzeitig ihre Entscheidung und auch die Sicherheit, mit welcher die Affen basierend auf ihrer Entscheidung eine Belohnung erwarteten. Somit konnte nachgewiesen werden, dass Rhesusaffen eine Bewertung ihrer eigenen kognitiven Leistung vornehmen.

1.5 Metakognition – Bedeutung und Darstellung

Die Bewertung der eigenen erbrachten kognitiven Leistung, also die Kognition über die eigene Kognition, wird als Metakognition bezeichnet. Erste Gedanken hierzu, die den Grundstein für die spätere Forschung legten, finden sich bereits in Schriften von Plato und Aristoteles [37]. Aktuell wird zu diesem noch relativ wenig untersuchten Themenkomplex intensive Forschung in unterschiedlichen Fachbereichen betrieben. Hierzu gehört nicht nur der Bereich der Neurowissenschaften, sondern auch die Computerwissenschaften und Philosophie [33].

Die Begriffsdefinition von Metakognition ist unscharf, so finden sich unterschiedliche Definitionen in den Arbeiten verschiedener Autoren. 1985 definierte Wellman Metakognition als „Denken über das Denken“ [37]. In einer Arbeit von 1998 wird Metakognition umschrieben als „Wissen und sich bewusst sein über Denkprozesse und die Fähigkeit, diese zu bewerten und zu strukturieren“ [38]. Die Gemeinsamkeit der unterschiedlichen Definitionen in der Literatur ist die Auffassung von Metakognition als Wissen bzw. Kenntnis des Individuums über die eigene Kognition und Wahrnehmung sowie die Fähigkeit bewusst damit umzugehen [38-40]. Kognition und Metakognition stehen hierbei in engem Zusammenhang, müssen jedoch trotzdem unterschieden werden. Verschiedene Studien beschäftigen sich mit der Frage, wie Metakognition abzugrenzen ist gegen

Selbstwahrnehmung und Bewusstsein, worauf hier nicht genauer eingegangen werden soll [33, 41].

Um metakognitive Leistungen zu messen und zu bewerten, wurden in der Vergangenheit verschiedene Methoden entwickelt [33, 37, 42]. Als konzeptuell günstig hat sich erwiesen, den Zusammenhang zwischen Richtigkeit (einer Entscheidung im Rahmen einer Wahrnehmungsaufgabe) und Zutrauen in die Richtigkeit der eigenen Entscheidung (z. B. durch Wettparadigmen) als objektives Maß für metakognitive Leistung heranzuziehen. Die Entscheidungssicherheit allein ist kein zuverlässiger Prädiktor für die tatsächliche Korrektheit einer Wahrnehmungsentscheidung, sondern ist häufig fehlerbehaftet und durch Tendenzen beeinflusst. So wird beispielsweise ein Proband mit einer sehr bescheidenen oder schüchternen Persönlichkeit eher zu einer niedrigen Entscheidungssicherheit tendieren, als ein Proband, der sehr selbstsicher ist [42]. Um den Zusammenhang zwischen perzeptueller Entscheidungssicherheit und tatsächlich erbrachter Wahrnehmungsleistung zu beschreiben, wurde daher der Begriff der metakognitiven Sensitivität definiert: Wie präzise entspricht die perzeptuelle Entscheidungssicherheit eines Probanden der Korrektheit (oder Inkorrektheit) einer getroffenen Entscheidung? Oder mit anderen Worten, inwieweit korreliert die Entscheidungssicherheit eines Probanden mit der objektiven Diskriminationsleistung [43]? Viele Studien errechnen hierzu Korrelationen, beispielsweise nach Pearson, welche jedoch als sehr anfällig für Verzerrungstendenzen gelten. Eine alternative Möglichkeit, die auch in dieser Studie zum Einsatz kam, wurde 2014 von Fleming und Lau propagiert [42]. Um subjektive Entscheidungssicherheit und metakognitive Sensitivität [42, 43] zu unterscheiden, wurde ein nicht parametrisches Maß angewandt, welches auf der Signalentdeckungstheorie und Receiver operating characteristics (ROC) beruht. Dieser statistische Ansatz gilt als weniger anfällig für Verzerrungen durch unerwünschte Einflüsse, wie beispielsweise persönliche Antworttendenzen wie oben beschrieben. Genauer wird hierauf noch im folgenden Teil der Arbeit, Material und Methoden, eingegangen.

Eine Studie aus dem Jahr 2012 konnte zeigen, dass sich selektive räumliche und merkmalsbasierte Aufmerksamkeit in unterschiedlichem Maße auf die objektive Wahrnehmungsleistung der Probanden und deren perzeptuelle Entscheidungssicherheit auswirkt [36]. Hier war der Einfluss selektiver Aufmerksamkeit auf die subjektive Entscheidungssicherheit in einer Wahrnehmungsaufgabe signifikant größer als auf die objektive Wahrnehmungsleistung. Der Einsatz selektiver Aufmerksamkeit kann also kognitive und metakognitive Prozesse voneinander dissoziieren. Dies legt die Schlussfolgerung nahe, dass die Entscheidungssicherheit ein eigenständiges Element visueller Wahrnehmungsprozesse darstellt, das in – zumindest partiell - unabhängigen neuronalen Netzwerken repräsentiert und verarbeitet wird. Auch in der vorliegenden Studie wurde selektive Aufmerksamkeit als Instrument eingesetzt, um Einflüsse auf kognitive und metakognitive Prozesse zu charakterisieren.

Dass spezifische neuronale Korrelate der perzeptuellen Entscheidungssicherheit darstellbar und messbar sind, konnte an Primaten erstmals 2009 gezeigt werden [35]. In Anlehnung an diese Studie untersuchten Zizlsperger et al. 2014 das Vorliegen unabhängiger elektrophysiologischer Korrelate für Entscheidungssicherheit am Menschen [44]: Unter kontrollierter selektiver Aufmerksamkeit wurde während einer Bewegungsdiskrimination und anschließender Konfidenzbewertung eine kontinuierliche EEG-Ableitung durchgeführt. Die EEG-Daten wurden mit Blick auf Unterschiede der ereigniskorrelierten Potentiale untersucht. Unabhängig von der Aufmerksamkeitsbedingung konnte ein erstes konfidenzkorreliertes Potential mit symmetrischer Verteilung über dem parietookzipitalen Kortex gefunden werden, welches außerdem mit der objektiven Wahrnehmungsleistung und der Stimulusstärke korrelierte. Ein weiteres, von Stimulus und Wahrnehmungsleistung unabhängiges Korrelat fand sich bei valider Aufmerksamkeitsbedingung mit einem parietalen Schwerpunkt. Bei invalider Aufmerksamkeitsausrichtung zeigte sich außerdem ein spätes kortikales Aktivierungsmuster, welches dem Muster im Zeitraum der Stimuluspräsentation im Hinblick auf die Polarität und die topografische Zuordnung stark ähnelte. Hieraus wurde geschlussfolgert, dass im Falle einer invalide ausgerichteten Aufmerksamkeit die primär eingegangene sensorische Information endogen reakti-

viert wird, um diese im Nachhinein analysieren zu können. Diese Ergebnisse belegen, dass metakognitive Prozesse beim Menschen spezifische, messbare neurophysiologische Korrelate haben und stützen die Annahme, dass Entscheidungssicherheit als eine eigenständige Entität des Wahrnehmungsprozesses zu begreifen ist.

1.6 Konkrete Fragestellung und Zielsetzung der Studie

Während die objektiven Veränderungen visueller Wahrnehmungsfähigkeiten im Laufe des Alterns bereits gut untersucht und analysiert wurden (s. o.), sind Untersuchungen zur subjektiven Bewertung visueller Wahrnehmung des alternden Menschen rar. Auch die Frage, ob der bewusste Einsatz metakognitiver Fähigkeiten dabei helfen kann, erworbene Defizite zu kompensieren und die objektive Wahrnehmungsleistung durch Bewusstmachen und Bewerten zu steigern, ist in der Literatur bis heute nicht ausreichend untersucht. Die vorliegende Studie möchte daher dazu beitragen, mögliche Zusammenhänge zwischen objektiven und subjektiven Wahrnehmungsfähigkeiten in Abhängigkeit des Alters zu beleuchten. Eine weitere Motivation für die Studie ist die Frage, welche Bedeutung dem bewussten Einsatz von Metakognition bei der Kompensation nachlassender Wahrnehmungsfähigkeiten im Laufe des Alterns zukommen könnte.

Konkret soll auf folgende Fragen eine Antwort gegeben werden:

1. Wie verändert sich die objektive visuelle Wahrnehmungsfähigkeit mit dem Alter am Beispiel der Diskrimination einer globalen Bewegungsrichtung?
2. Wie verändert sich die perzeptuelle Entscheidungssicherheit, also die subjektive Einschätzung der Wahrnehmungsfähigkeit, mit dem Alter?
3. Wie verändert sich die metakognitive Sensitivität mit zunehmendem Alter? Mit anderen Worten, wie gut entspricht die subjektive Einschätzung dem tatsächlichen Diskriminationserfolg im Alter?

4. Welchen Einfluss hat selektive Aufmerksamkeit auf diese drei unterschiedlichen Bestandteile des integralen Wahrnehmungsvorgangs, untersucht am Beispiel räumlicher und merkmalsbasierter Aufmerksamkeit und wie verändert sich der jeweilige Aufmerksamkeitseffekt mit dem Alter?
5. Hat die zeitliche Latenz zwischen wahrgenommenem Stimulus und motorischer Antwort einen Einfluss auf die objektive oder subjektive Leistung und wie verhält sich dieser mögliche Einfluss im Laufe des Alters?
6. Wie entwickeln sich objektive und subjektive Wahrnehmungsleistung im Laufe des Alterns im Vergleich zueinander? Verhalten diese sich gleichsinnig, gegensinnig oder unabhängig voneinander?
7. Wie unterscheiden sich die Effekte selektiver räumlicher und merkmalsbasierter Aufmerksamkeit in ihrem Einfluss auf perzeptuelle, kognitive und metakognitive Prozesse?

Um Antworten auf diese Fragen zu geben, wurden in der vorliegenden Psychophysikstudie 50 gesunde Probanden in einem Alter zwischen 20 und 69 Jahren umfangreichen visuellen Tests unterzogen. Dies ermöglichte es, trotz starker interindividueller Unterschiede in der Wahrnehmungsleistung, die Einflüsse zunehmenden Alters zu beschreiben. Aufgabe der Probanden war es, visuelle Diskriminationen vorzunehmen und die Sicherheit der getroffenen Entscheidungen anzuzeigen. Selektive räumliche und merkmalsbasierte Aufmerksamkeit wurde als weiteres Instrument genutzt, um die objektive Leistungsfähigkeit der Probanden zu modulieren. Darüber hinaus wurde im ersten Teil der Studie zur räumlichen Aufmerksamkeit der zeitliche Ablauf des Experiments zwischen Stimulation und zu gebender Antwort in drei Stufen variiert. Mit dieser Variation sollte geprüft werden, ob gegebenenfalls auftretende Störungen durch längere Verarbeitungszeit im Alter kompensiert werden können.

2. Material und Methoden

In allen durchgeführten Experimenten wurde unter stationärer Fixation die Fähigkeit der Probanden quantifiziert, innerhalb eines bewegten Reizes die dominierende, globale Bewegungsrichtung zu diskriminieren. Diese Leistung wurde in Abhängigkeit verschiedener Parameter und in verschiedenen Kontexten erfasst. In allen Experimenten wurde ein besonderes Augenmerk auf die Altersabhängigkeit der individuellen Wahrnehmungsleistungen gelegt. Neben der Frage nach der objektiven Diskriminationsleistung, d. h. ob der Proband die Bewegungsrichtung korrekt erkennen konnte, wurde in einem Teil der Experimente auch die subjektive perzeptuelle Entscheidungssicherheit erfragt, mit der er sich für eine bestimmte Richtung entschieden hatte. Variiert wurden folgende Parameter:

- Kohärenz des bewegten Reizes (zum Begriff Kohärenz s. u.), hierdurch wurde die Aufgabe für den Probanden generell schwieriger oder leichter.
- Valide oder invalide gerichtete Aufmerksamkeit – räumlich oder merkmalsbasiert. Die Probanden wurden instruiert, ihre Aufmerksamkeit gezielt auszurichten und andere periphere Reize bestmöglich zu ignorieren.
- Latenz des Zeitpunktes, zu dem der Proband angeben sollte, welche Richtung er erkannt hat (nur im Experiment zur räumlichen Aufmerksamkeit).

2.1 Versuchspersonen

Insgesamt nahmen 50 gesunde Probanden im Alter zwischen 20 und 69 Jahren an dem Experiment teil. 28 Probanden waren weiblich und 22 männlich. Das mittlere Alter betrug 43,88 Jahre mit einer Standardabweichung von 14,83. Die Probanden wurden in 5 Altersgruppen (Dekaden) eingeteilt. Jede Altersgruppe umfasste jeweils zehn Probanden eines bestimmten Alters:

- Altersgruppe 1 umfasste Probanden zwischen dem 20. und dem 29. Lebensjahr. Das mittlere Alter betrug 24,3 Jahre mit einer Standardabweichung von 1,89.
- Altersgruppe 2 umfasste Probanden zwischen dem 30. und dem 39. Lebensjahr. Das mittlere Alter betrug 31,7 Jahre mit einer Standardabweichung von 2,21.
- Altersgruppe 3 umfasste Probanden zwischen dem 40. und dem 49. Lebensjahr. Das mittlere Alter betrug 45 Jahre mit einer Standardabweichung von 2,62.
- Altersgruppe 4 umfasste Probanden zwischen dem 50. und dem 59. Lebensjahr. Das mittlere Alter betrug 54,2 Jahre mit einer Standardabweichung von 2,9.
- Altersgruppe 5 umfasste Probanden zwischen dem 60. und dem 69. Lebensjahr. Das mittlere Alter betrug 64,2 Jahre mit einer Standardabweichung von 2,35.

Das Probandenalter wurde bewusst auf maximal 69 Jahre begrenzt, da vorangegangene Studien auf Defizite im Bereich der selektiven Aufmerksamkeit bei Probanden im Alter über 70 Jahre hindeuten [45].

Neben den in dieser Arbeit vorgestellten Experimenten zur räumlichen und merkmalsbasierten Aufmerksamkeit absolvierten dieselben Probanden weitere Experimente, z. B. zum visuellen Arbeitsgedächtnis und zur Altersabhängigkeit bistabiler visueller Reize. Diese flossen in die vorliegende Arbeit nicht ein, sondern werden in einer anderen Arbeit dargestellt. Alle Probanden waren entweder primär normalsichtig oder trugen ihre gewohnte Sehhilfe, um vorhandene Refraktionsfehler zu korrigieren. Die Farbsichtigkeit der Versuchspersonen wurde anhand standardisierter Ishihara-Farbtafeln geprüft. Alle Probanden verneinten psychiatrische oder neurologische Grunderkrankungen, ebenso den Konsum zentral wirksamer Medikamente und den schädlichen Gebrauch von Alkohol. Alle Probanden willigten nach ausführlicher Instruktion über Versuchsaufbau und –ablauf in die Untersuchung ein. Nach der Datenerhebung wurden die Daten der Probanden pseudonymisiert.

2.2 Technischer Aufbau

2.2.1 Versuchsanordnung

Die Experimente wurden in einem stillen, vollständig abgedunkelten Raum durchgeführt. Die Probanden saßen auf einem bequemen Untersuchungsstuhl mit Nackenstütze, der sich vor dem Bildschirm befand, auf dem die Stimuli präsentiert wurden. Sie wurden so positioniert, dass der Abstand zwischen Bildschirm und Nasenrücken des Probanden 57 cm betrug. Zur Stimuluspräsentation wurde ein 19-Zoll LCD-Bildschirm der Firma NEC (Modell: 90GX2 pro) mit einer Auflösung von 1280 x 1024 Pixeln und einer Bildwiederholungsfrequenz von 60 Hz verwendet. Dieser wurde durch einen Linuxcomputer angesteuert, welcher die visuellen Reize erzeugte. Alle Stimuli wurden mit dem Programm nrec (open source nrec measurement system, <http://nrec.neurologie.uni-tuebingen.de>, erstellt von F. Bunjes, J. Gukelberger et al.) generiert.

2.2.2 Aufzeichnung der Augenbewegung

Alle Tests erfolgten unter stationärer Fixation. Während der gesamten Versuchsdurchführung wurde die Pupillenposition eines Auges des Probanden durch ein Infrarotvideosystem mit einer Aufzeichnungsrate von 50 Hz registriert und anschließend analysiert. Die Augenposition wurde durch Extraktion von drei Punkten auf dem Auge errechnet: der Pupillenposition einerseits, die sich durch Bewegungen des Auges entsprechend veränderte, und der Position zweier Purkinjereflexe, die durch Infrarotscheinwerfer auf das Auge gebracht wurden. Die relativen Abstände dieser drei Maße wurden automatisiert ausgewertet und parallel zu der visuellen Stimulation im Programm nrec gespeichert.

Zu Beginn jeder Messung wurde eine Kalibrierung durchgeführt, während der die Probanden vorgegebene Punkte innerhalb eines definierten Rasters auf dem Bildschirm fixieren sollten. Aufgabe der Probanden in allen Tests war es, während der gesamten Präsentation einen zentralen Punkt zu fixieren, während sich die zu diskriminierenden Stimuli, im Folgenden als Teststimuli bezeichnet,

im peripheren Gesichtsfeld befanden. Daher wurde besonders während der Zeitspanne der Präsentation des Teststimulus darauf geachtet, dass der Fixationspunkt tatsächlich fixiert wurde und nicht etwa eines der beiden Halbfelder. Alle Reize wurden binokular präsentiert.

2.2.3 Visuelle Stimulation

In allen Tests wurden immer zwei konkurrierende Bewegungsreize präsentiert, von denen der eine zu diskriminieren, und der andere zu ignorieren war. Auf diese Weise sollte untersucht werden, welchen Einfluss das gezielte Ausrichten von visueller Aufmerksamkeit auf eine bestimmte Position im Gesichtsfeld (räumliche Aufmerksamkeit) bzw. auf ein bestimmtes Merkmal (merkmalsbasierte Aufmerksamkeit) auf die individuelle Wahrnehmungsleistung hat und wie sich diese Leistung in Abhängigkeit vom Alter verändert. Zusätzlich dazu wurde im Experiment zur räumlichen Aufmerksamkeit untersucht, wie sich Instruktionen zur Aufmerksamkeit auf Entscheidungssicherheit und metakognitive Sensitivität der Probanden auswirken.

Um die visuelle Diskriminationsleistung der Probanden zu untersuchen, wurde ein im Jahr 1988 von Newsome und Paré erstmals eingesetzter Stimulus verwendet, der seither als Standardparadigma gilt: ein Punktkinematogramm [46]. Hierbei handelt es sich um eine Gruppe von Punkten, die sich innerhalb eines vorgegebenen Felds in unterschiedliche Richtungen bewegen. Ab einem gewissen Anteil sich gleichsinnig bewegender Punkte kann diese gerichtete Bewegung innerhalb der Gesamtpopulation erkannt werden. Man spricht bei dem Anteil sich gleichsinnig bewegender Punkte von kohärenter Bewegung oder Kohärenz. Besteht beispielsweise eine Punktwolke aus 100 Punkten, von denen sich 70 in zufällig ausgewählte Richtungen bewegen, 30 hingegen gleichsinnig nach oben, liegt eine Kohärenz von 30 % vor. Die Schwelle, ab welcher Kohärenz eine gerichtete Bewegung erkannt wird, ist individuell sehr unterschiedlich. Generell wird es jedoch mit abnehmender Kohärenz schwieriger, eine globale Bewegungsrichtung zu diskriminieren. Zahlreiche Vorgängerstudien haben mit vergleichbaren Stimuli bei Primaten [47, 48] und Humanproban-

den gearbeitet [36, 49, 50]. In den Experimenten der vorliegenden Studie bewegten sich die kohärenzmodulierten Punkte entweder nach oben, unten, links oder rechts.

Um die visuelle Diskriminationsfähigkeit der Probanden zu quantifizieren, wurde für die jeweilige Bedingung (Kohärenz, Aufmerksamkeitsbedingung, Verzögerungsintervall) der prozentuale Anteil korrekt erkannter Testdurchgänge berechnet. Die Kohärenzen der Bewegungsreize und damit die Schwierigkeit der Diskrimination wurden durch die Methode der konstanten Stimuli oder Konstant-Reiz-Methode festgelegt. Hierbei werden dem Probanden wiederholt Punktkinematogramme mit vordefinierten Kohärenzstufen präsentiert und anschließend die Häufigkeit der richtig erkannten Richtungen in Abhängigkeit von der Kohärenzstufe errechnet. In beiden durchgeführten Experimenten wurden vier verschiedene Kohärenzstufen gewählt: 5 %, 20 %, 50 %, 100 %. Jede Stufe wurde gleich oft in pseudorandomisierter Abfolge präsentiert. Im Experiment zur merkmalsbasierten Aufmerksamkeit kam außerdem in einem Teil der experimentellen Durchgänge die adaptive PEST Strategie zum Einsatz [51]. Ursprünglicher Gedanke, diese Strategie einfließen zu lassen, war es, die Auswertung auf die Bestimmung einer Wahrnehmungsschwelle zu reduzieren. Es zeigte sich jedoch, dass die notwendigen mathematischen Approximationen bei den meisten Probanden nicht ausreichend signifikant waren. Aus diesem Grund flossen die PEST-Durchgänge nicht in die abschließende statistische Datenanalyse ein. Wie im Experiment zur räumlichen Aufmerksamkeit wurden ausschließlich die mittels Konstant-Reiz-Methode erhobenen Daten ausgewertet. Auf diese Weise konnten die Ergebnisse der einzelnen Probanden auch zwischen den beiden Experimenten verglichen werden. Wie schon erwähnt wurden die Probanden in beiden Tests instruiert, stets einen zentralen Punkt zu fixieren. Um den Einfluss gerichteter Aufmerksamkeit untersuchen zu können, wurde dem Probanden vor Darbietung des Diskriminationsreizes angezeigt, welcher der zwei Bewegungsreize relevant sein würde. Im ersten Experiment wurden die Probanden aufgefordert, ihre Aufmerksamkeit entweder ins rechte oder linke visuelle Halbfeld zu richten. In diesem Fall gab ein vorab präsentierter Pfeil die gewünschte Aufmerksamkeitsrichtung an. Im

anderen Experiment sollte eines von zwei übereinander präsentierten und farblich unterschiedlichen Punktefeldern bewertet werden (rot oder grün), vorgegeben durch einen entsprechenden Farbwechsel des zentralen Fixationspunktes. Zu keinem Zeitpunkt sollte der Blick von diesem zentralen Fixationspunkt abgewandt werden. Erst nachdem ein zweiter Pfeil bzw. Farbwechsel des Fixationspunktes präsentiert wurde, konnten die Probanden die von Ihnen erkannte Bewegungsrichtung angeben. In 80 % der Fälle stimmten die Richtungen bzw. Farben überein. Mit anderen Worten, in 80 % der Darbietungen wurde die Aufmerksamkeit valide auf die zu diskriminierende Punktewolke gerichtet (valide Aufmerksamkeitsbedingung). In den anderen 20 % der Fälle wurden die Probanden am Ende des Durchganges instruiert, diejenige Punktewolke zu bewerten, die sie gemäß der ursprünglichen Instruktion eigentlich ignorieren sollten (invalide Aufmerksamkeitsbedingung). Vor der eigentlichen Messung absolvierte jeder Proband zwischen 50 und 70 Testdurchläufe pro Experiment, um mit den Aufgaben, der zeitlichen Abfolge der Stimulusdarbietung und den Tastendrücken vertraut zu werden. Diese wurden in den weiteren Analysen nicht berücksichtigt. Anschließend absolvierte jeder Proband in den zwei Messungen jeweils ca. 450 Einzeldarbietungen. Die angestrebte Gesamtdauer betrug etwa vier bis viereinhalb Stunden, es wurden mehrere Pausen eingelegt, je nach Bedarf des Probanden.

2.2.3.1 Experiment zur räumlichen Aufmerksamkeit

Ein einzelner Durchgang im Test zur räumlichen Aufmerksamkeit war gegliedert in sechs Abschnitte (Abbildung 1). Zunächst wurde dem Probanden für 500 ms der zentrale Fixationspunkt präsentiert, der in diesem Fall rot war und einen Durchmesser von zwei Winkelminuten hatte. Es folgte für weitere 500 ms ein zentraler Pfeil (Maße: $3^\circ \times 1^\circ$, weiß, Leuchtdichte 384 cd/m^2). Dieser zeigte an, auf welches Halbfeld der Proband seine Aufmerksamkeit lenken sollte, ohne jedoch die Fixation des zentralen Punktes aufzugeben. Anschließend folgten zwei simultan präsentierte Punktkinematogramme, eines auf jeder Seite, in welchen sich randomisiert angeordnete Punkte auf schwarzem Hintergrund zu-

nächst inkohärent in alle möglichen Richtungen bewegten. Die Punktkinematogramme maßen $9^\circ \times 9^\circ$, befanden sich im Abstand von 13° vom Fixationspunkt und umfassten jeweils 475 Punkte (Seitenlänge 0,8 Winkelminuten, Lebensdauer 500 ms, Punktdichte ~ 6 Punkte pro deg^2 , Leuchtdichte 384 cd/m^2). Dieser, als Prästimulus bezeichnete Reiz, wurde für 500 ms präsentiert und war direkt gefolgt vom eigentlichen Teststimulus. Hierbei handelte es sich um ein zweites Paar Punktkinematogramme, in welches das erste Paar überging. Die Punktwolken des Teststimulus enthielten einen definierten Anteil von Punkten, die sich gleichsinnig bewegten. Diese kohärente Bewegung, entweder nach oben, nach unten, nach links oder nach rechts, musste durch den Probanden erkannt werden. Die Kohärenz der Reize war auf beiden Seiten im gegebenen Einzeldurchgang identisch, deren Richtung jedoch wurde pseudorandomisiert. Die Kohärenzstufen wurden nach der Konstant-Reiz-Methode gewählt und betragen vordefiniert 5, 20, 50 oder 100 %. Jede Kohärenzstufe wurde gleich häufig in pseudorandomisierter Abfolge präsentiert. Die Dauer des Teststimulus betrug 250 ms. Auf die Präsentation des Teststimulus folgte ein zweiter zentraler Pfeil, der angab, über welches Punktkinematogramm der Proband nun tatsächlich eine Aussage treffen sollte. Wie oben angesprochen, waren in 80 % der Fälle der erste und der zweite Pfeil identisch (valide Aufmerksamkeitsbedingung), in den übrigen 20 % zeigten sie in unterschiedliche Richtungen (invalide Aufmerksamkeitsbedingung). Es gab drei unterschiedliche Zeitpunkte, zu denen der zweite Pfeil erscheinen konnte, entweder direkt im Anschluss an den Teststimulus (also mit einer Latenz von 0 s) oder mit einer zeitlichen Verzögerung von entweder 2,5 s oder 5 s. Entsprechend längere Zeit hatte der Proband, um den Stimulus im Nachhinein zu analysieren. Andererseits musste der Proband die Reize jedoch auch länger im Gedächtnis speichern, insbesondere im invaliden Fall, der es notwendig machte, den Wahrnehmungseindruck der Gegenseite nach einem längeren Intervall aus dem Gedächtnis wiederherzustellen. Nach dem Erscheinen des zweiten Pfeiles war es die Aufgabe des Probanden, zunächst durch Tastendruck auf einem Antwortkästchen, die von ihm erkannte Bewegungsrichtung des relevanten Punktkinematogramms wiederzugeben. Zu bewerten war der Reiz in dem Halbfeld, auf das der zweite Pfeil zeigte. Es gab

vier mögliche Bewegungsrichtungen, oben, unten, links und rechts. Die Tasten auf dem Antwortkästchen waren in entsprechender Orientierung angeordnet. Durch einen ersten Tastendruck konnte somit der Diskriminationserfolg des Probanden ermittelt werden. Durch einen zweiten Tastendruck sollte die perzeptuelle Entscheidungssicherheit, mit der sich der Proband für die zuvor angegebene Richtung entschieden hat, mitgeteilt werden. Um den Ablauf des Experiments intuitiver zu gestalten und die Probanden zusätzlich zu motivieren, wurde hierfür die Methode eines virtuellen Wettspiels gewählt [52]. Die Probanden wurden aufgefordert, per Tastendruck einen Wetteinsatz von einem oder zehn Punkten zu setzen, je nachdem, ob sie sich ihrer vorherigen Entscheidung eher unsicher oder eher sicher waren. Lag der Proband mit der angegebenen Richtung richtig, wurden die gesetzten Punkte einem virtuellen Guthaben gutgeschrieben, lag er falsch, wurden sie abgezogen. Das Wettspiel startete mit einem „Startguthaben“ von 100 virtuellen Punkten. Für den zweiten Tastendruck standen nur zwei der vorher vier möglichen Tasten zur Verfügung, die linke Taste für einen Punkt, die rechte Taste für zehn Punkte. Wurde eine der beiden anderen, nicht vorgesehenen Tasten gedrückt, wurde dieser Durchlauf als ungültig gewertet und das Guthaben blieb unverändert. Durch den zweiten Tastendruck beendete der Proband automatisch den Einzeldurchgang und erhielt durch unmittelbares Erscheinen des neuen Punktestands (Maße: $7,5^\circ \times 6^\circ$, weiß, Leuchtdichte 384 cd/m^2) für 1000 ms ein direktes Feedback über die Korrektheit seiner vorherigen Angabe. Die Probanden wurden vorab informiert, dass keine Auszahlung eines realen monetären Gegenwerts erfolgen würde, sondern nur ein virtueller „High-Score“ zu erreichen sei.

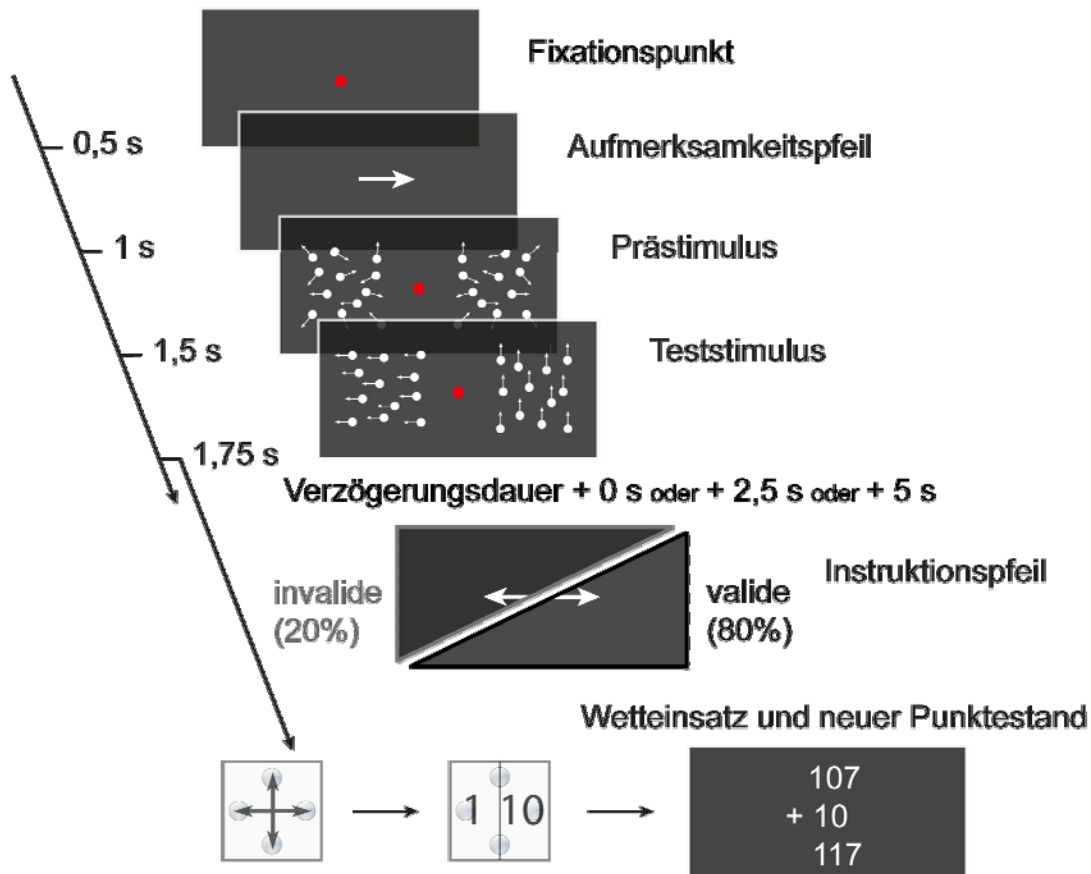


Abbildung 1: schematische Darstellung des zeitlichen Ablaufs des visuellen Stimulus beim Experiment zur räumlichen Aufmerksamkeit. Jeder Durchgang begann mit der Präsentation des zentralen Fixationspunktes für 500 ms, gefolgt von einem Pfeil, der die Richtung der gewünschten Aufmerksamkeitsausrichtung angab. Nach Präsentation des Prästimulus für 500 ms folgte der eigentliche Teststimulus für 250 ms, der auf beiden Seiten eine kohärente Bewegungsrichtung beinhaltete (hier: 100 % Kohärenz, linkes Halbfeld mit Bewegung nach links, rechts Halbfeld mit Bewegung nach oben). Nach einer variablen Verzögerungsdauer (0; 2,5 oder 5 s) zeigte der Instruktionspfeil an, welches der zwei Punktkinematogramme zu bewerten war. In 80 % der Durchgänge war die Richtung des Instruktionspfeils identisch zum Aufmerksamkeitspfeil (valide Aufmerksamkeitsbedingung), in 20 % der Durchgänge war die Richtung der zwei Pfeile entgegengesetzt (invalide Aufmerksamkeitsbedingung). Der Proband gab zwei Antworten. Mit der ersten Antwort zeigte er die Richtung der globalen Bewegung an. Mit dem zweiten Tastendruck konnte der Proband einen hohen (10 Punkte) oder einen niedrigen (1 Punkt) Wetteinsatz auf seine Diskriminationsleistung geben, der ihm entsprechend seines Diskriminationserfolges gutgeschrieben oder abgezogen wurde. Der Einzeldurchgang schloss mit der Präsentation des neuen Punkteguthabens ab (im Beispiel hier: erfolgreiche Diskrimination mit hohem Wetteinsatz).

2.2.3.2 Experiment zur merkmalsbasierten Aufmerksamkeit

Das Experiment zur merkmalsbasierten Aufmerksamkeit ähnelte im Ablauf dem Experiment zur räumlichen Aufmerksamkeit. Da in diesem Fall jedoch ausschließlich die Diskriminationsleistung, nicht jedoch die perzeptuelle Entscheidungssicherheit erfasst wurde, war der Aufbau weniger komplex. Wie im ersten Experiment begann jeder Durchgang mit der Präsentation eines zentralen Fixationspunktes (Durchmesser zwei Winkelminuten, Leuchtdichte 384 cd/m^2), der in diesem Fall weiß war (Abbildung 2). Nach 500 ms wechselte der zentrale Punkt die Farbe und wurde entweder rot oder grün. Dieser Farbwechsel gab dem Probanden an, auf welche Farbe er seine Aufmerksamkeit bevorzugt richten sollte. Nach weiteren 500 ms erschien pseudorandomisiert entweder im linken oder im rechten Halbfeld ein Punktkinematogramm (Maße: $9^\circ \times 9^\circ$, Abstand zum Fixationspunkt: 13°), in welchem sich zeitgleich zwei unterschiedliche Punktpopulationen bewegten, eine grüne und eine rote, bestehend aus jeweils 235 Punkten (Durchmesser 0,6 Winkelminuten, Lebensdauer $\sim 100 \text{ ms}$, Punktdichte ~ 6 Punkte pro deg^2 , auf schwarzem Hintergrund (Leuchtdichte $0,14 \text{ cd/m}^2$)). Die Bewegungsrichtung aller Punkte war zunächst für 1000 ms völlig inkohärent (Prästimulus). Es folgte für 500 ms der eigentliche Teststimulus, der in beiden Populationen (rot und grün) Punkte mit gleichsinniger (kohärenter) Bewegung enthielt. Die Kohärenz für die roten und die grünen Punkte war identisch, die Bewegungsrichtung jedoch konnte sich unterscheiden. Die Leuchtdichte der roten und grünen Punkte war identisch. Die Kohärenzstufen in diesem Experiment wurden nach zwei unterschiedlichen Prinzipien gewählt, nach der Konstant-Reiz-Methode mit denselben Stufen wie im vorherigen Experiment (5, 20, 50 oder 100 % Kohärenz) oder nach der adaptiven PEST-Strategie im Verhältnis 50:50. Die PEST-Durchgänge flossen, wie oben erläutert, nicht in die abschließende statistische Datenanalyse ein. Nach Abschluss der Teststimuluspräsentation wechselte der Fixationspunkt erneut die Farbe und erschien wieder weiß. Ein zweiter Farbwechsel nach weiteren 500 ms zeigte dem Probanden an, über welche Punktpopulation er schließlich tatsächlich eine Aussage treffen sollte. Analog zum ersten Experiment stimmten auch in diesem Experi-

ment in 80 % der Einzeldurchgänge der erste und der zweite Farbwechsel überein. In 20 % der Fälle jedoch war der erste Hinweis falsch und der Proband musste die Punktpopulation bewerten, die er nicht selektiv beachtet hatte. Nach der Präsentation des zweiten Farbwechsels gab der Proband per Tastendruck die erkannte Bewegungsrichtung der erfragten Punktpopulation an und beendete somit den Durchlauf. Das Antwortkästchen war in beiden Experimenten identisch, die möglichen Richtungen waren auch hier oben, unten, links oder rechts.

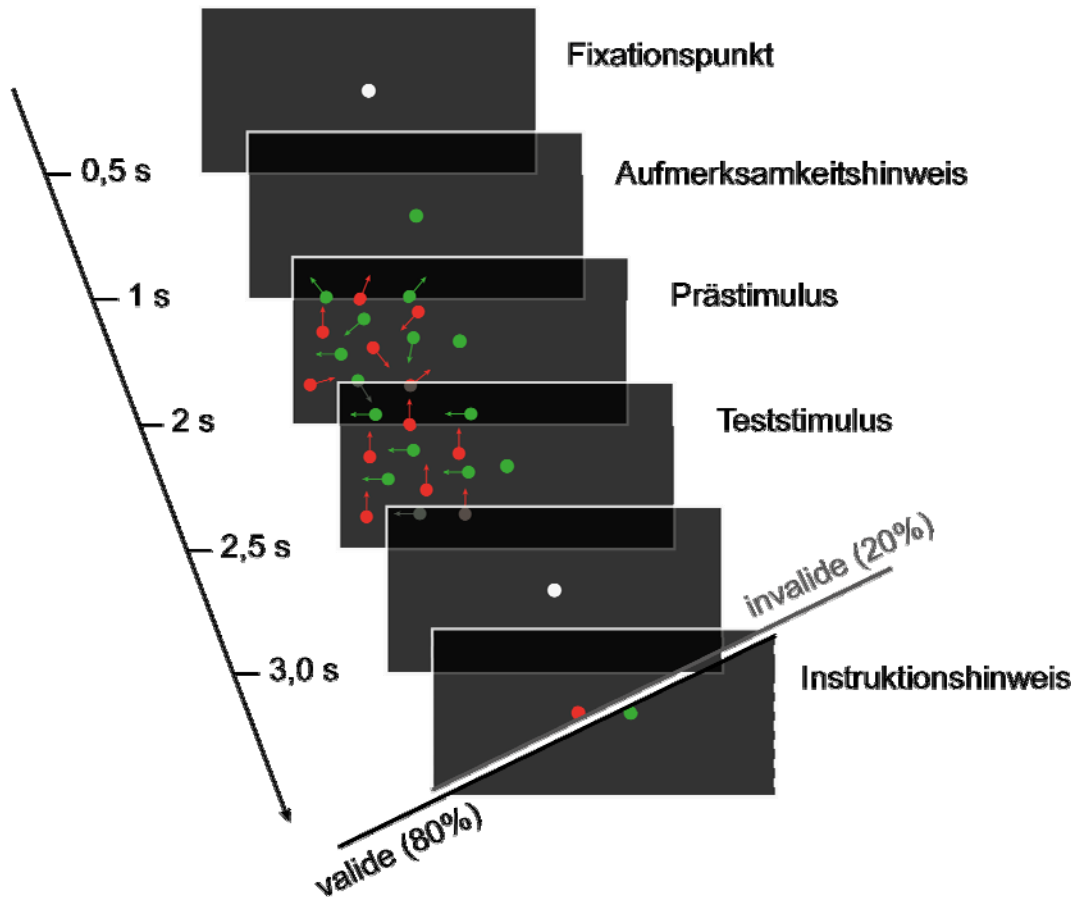


Abbildung 2: schematische Darstellung des zeitlichen Ablaufs des visuellen Stimulus beim Experiment zur merkmalsbasierten Aufmerksamkeit. Die Präsentation begann jeweils mit einem zentralen, weißen Fixationspunkt. Dieser wechselte nach 500 ms die Farbe, entweder zu Rot oder zu Grün, und gab somit die gewünschte Aufmerksamkeitsausrichtung an. Nach weiteren 500 ms erschien im rechten oder linken Halbfeld zunächst der Prästimulus für 1000 ms. Der eigentliche Teststimulus folgte dann für weitere 500 ms. Dieser beinhaltete zwei übereinanderliegende Punktkinematogramme, ein rotes und ein grünes, identischer Kohärenz (hier: 100 % Kohärenz, das grüne Punktkinematogramm mit Bewegung nach links, das rote Punktkinematogramm mit Bewegung nach oben). Nach Abschluss der Präsentation des Teststimulus wechselte der Fixationspunkt wieder auf die Farbe Weiß. Nach weiteren 500 ms zeigte ein erneuter Farbwechsel des Fixationspunktes zu Rot oder Grün dem Probanden an, welches der zwei Punktkinematogramme zu bewerten war. In 80 % der Durchgänge stimmten der erste und der zweite Farbwechsel überein (valide Aufmerksamkeitsbedingung), in 20 % der Durchgänge war die angegebene Farbe des ersten und des zweiten Farbwechsels nicht identisch (invalide Aufmerksamkeitsbedingung). Der Proband gab durch Drücken der entsprechenden Taste auf dem Antwortkästchen die von ihm erkannte Bewegungsrichtung an und beendete damit den Einzeldurchgang.

2.3 Statistische Auswertung der psychophysischen Daten

Die perzeptuellen Antworten sowie die aufgezeichneten Augenpositionsdaten wurden im Anschluss an die Versuchsdurchführung in Matlab R2012b (The MathWorks Inc. Natick, MA, USA) importiert und analysiert. Durchgänge mit nicht zulässigen Tastenkombinationen wurden als nicht gültig verworfen. Als Maß der objektiven Diskriminationsleistung wurde in beiden Experimenten der relative Anteil der Durchläufe berechnet, in welchen die globale Bewegung korrekt erkannt wurde. Um den Effekt selektiv ausgerichteter Aufmerksamkeit zu erfassen, wurden zwei Betrachtungen angestellt. In einem ersten Vergleich wurden die Diskriminationsleistungen (Anteil korrekt erkannter Durchgänge in Prozent) für die beiden Aufmerksamkeitsbedingungen durch eine Varianzanalyse statistisch miteinander verglichen. In einem zweiten Vergleich wurde ein relatives Maß berechnet, welches die Verbesserung bei valider Aufmerksamkeit gegenüber der invaliden Bedingung in einem Aufmerksamkeitsindex abbildete. Dieser Index wurde definiert als Differenzenquotient: Diskriminationserfolg bei valider Aufmerksamkeit minus Diskriminationserfolg bei invalider Aufmerksamkeit dividiert durch den Diskriminationserfolg bei valider Aufmerksamkeit. Anschaulich gibt dieser Aufmerksamkeitsquotient also die relative Diskriminationsverbesserung wieder, die durch valide Aufmerksamkeitsausrichtung erreicht wird. Dieser Index wurde dann wiederum einer Varianzanalyse unterzogen.

Im Experiment zur räumlichen Aufmerksamkeit wurde darüber hinaus auch die perzeptuelle Entscheidungssicherheit in Abhängigkeit der verschiedenen Faktoren (Kohärenz, Alter, Aufmerksamkeitsbedingung, Zeitgang des Stimulus) untersucht. In einem abschließenden Schritt wurden außerdem die objektive Diskriminationsleistung und die subjektive Entscheidungssicherheit in Bezug zueinander gesetzt. Hierfür wurde als etabliertes Maß die metakognitive Sensitivität errechnet, die angibt, wie gut die perzeptuelle Entscheidungssicherheit die tatsächliche Wahrnehmungsleistung abbildet, d. h. anzeigt, wie zuverlässig der Proband seine erbrachte Wahrnehmungsleistung einschätzen kann [43, 53].

Zur Quantifizierung der perzeptuellen Entscheidungssicherheit wurde ein Sicherheitsindex errechnet, welcher auf der Höhe des gesetzten Wetteinsatzes basierte: Einem niedrigen Wetteinsatz, also jedem Durchlauf mit einem gesetzten Punkt, wurde ein Wert von 0,25 (entsprechend der Ratewahrscheinlichkeit von 25 %) zugeordnet, einem hohen Wetteinsatz, also Durchläufen mit zehn gesetzten Punkten, ein Wert von 1. Dies ist eine konventionelle Verschiebung der Zahlenwerte in einen Raum, welcher den möglichen Diskriminationsleistungen entspricht, und es damit erlaubt, die Sicherheitsbewertungen anschaulicher mit der Diskriminationsleistung zu vergleichen. Für jede gegebene Bedingung (Kohärenz, Aufmerksamkeit, usw.) wurde der individuelle Mittelwert dieses Sicherheitsindex berechnet. Die Berechnung der metakognitiven Sensitivität erfolgte in Anlehnung an eine Arbeit aus dem Jahr 2014, die eine Berechnung auf Basis der Signalentdeckungstheorie und Receiver operating characteristics (ROC) vorschlägt [42]. Die Signalentdeckungstheorie stellt ein theoretisches Konstrukt bei dichotomen Entscheidungen dar und ermöglicht eine Quantifizierung der Verlässlichkeit des Entscheidungsträgers. Eine Entscheidung zwischen zwei Optionen, die unterschieden werden müssen, kann entweder korrekt oder falsch sein. Dies war auch in den vorliegenden Experimenten der Fall: Die Probanden mussten sich entscheiden zwischen hoher oder niedrigerer Entscheidungssicherheit und auch hier konnte die Entscheidung richtig (also übereinstimmend mit der Wahrnehmungsleistung) oder falsch sein. Es ergaben sich somit vier verschiedene Kombinationsmöglichkeiten (vgl. hierzu Tabelle 1). Trägt man die Richtig-Positiv-Rate gegen die Falsch-Positiv-Rate für ein Konfidenzniveau auf, erhält man die dazugehörige ROC-Kurve. Bei einem Probanden, der immer nur rät, ergibt sich entsprechend eine Gerade mit der Steigung eins (die Konfidenz korreliert nicht mit dem Diskriminationserfolg, der zufällig ist). Bei Probanden mit hoher metakognitiver Sensitivität steigt die Kurve steil an und erreicht im Verlauf einen Sättigungswert. Die metakognitive Sensitivität errechnet sich in dieser Analyse als „Area Under the (ROC-) Curve“, oder kurz AUROC, wobei eine größere AUROC einer größeren metakognitiven Sensitivität entspricht. Diese Berechnung ist frei von Antworttendenzen und stellt daher ein zuverlässiges Maß der metakognitiven Sensitivität dar. Die metakognitive

Sensitivität wurde für jeden Probanden für die verschiedenen Bedingungen berechnet.

Der oben dargestellte parametrisierte Aufmerksamkeitsquotient wurde nicht nur für den Diskriminationserfolg, sondern genauso auch für die perzeptuelle Entscheidungssicherheit und die metakognitive Sensitivität errechnet.

Wahrnehmungsaufgabe	Hohe Konfidenz 10 Wettpunkte	Niedrige Konfidenz 1 Wettpunkt
Korrekt gelöst	Globalbewegung korrekt erkannt, richtigerweise 10 Punkte gesetzt	Globalbewegung korrekt erkannt, fälschlicherweise 1 Punkt gesetzt
Nicht korrekt gelöst	Globalbewegung nicht korrekt erkannt, fälschlicherweise 10 Punkt gesetzt	Globalbewegung nicht korrekt erkannt, richtigerweise 1 Punkt gesetzt

Tabelle 1: schematische Darstellung der verschiedenen Kombinationsmöglichkeiten aus korrekter und falscher Antwort und hoher und niedriger Konfidenz bei der absolvierten Wahrnehmungsaufgabe (modifiziert nach Fleming und Lau 2014 [42]).

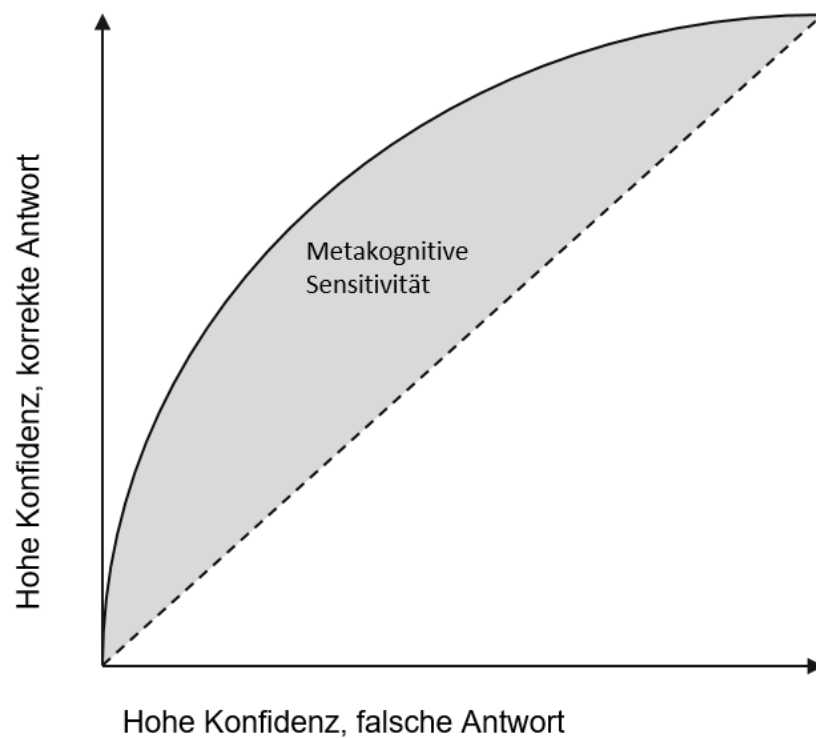


Abbildung 3: schematische Darstellung der ROC-Kurve. Diese ergibt sich durch Auftragen der Häufigkeit richtig beantworteter Testdurchläufe (y-Achse) gegen die Häufigkeit falsch beantworteter Durchgänge (x-Achse) bei identischer, hoher Konfidenz. Ein Proband, der immer raten würde (trotz hoher Konfidenz), würde mit seinen Antworten auf der gestrichelten Geraden liegen. Ein Proband, der bei hoher Sicherheit auch häufig richtig diskriminiert, liegt mit seinen Antworten über dieser Linie. Die metakognitive Sensitivität errechnet sich als Fläche unter der ROC-Kurve oder Area Under the (ROC-) Curve oder AUROC (modifiziert nach Fleming und Lau 2014 [42]).

Nachdem die oben genannten Parameter auf individueller Basis berechnet waren, wurden die Daten für gruppenstatistische Analysen schließlich mit dem Programm SPSS (IBM SPSS Statistics, Version 21) ausgewertet. Hierzu wurden ein- und mehrfaktorielle Varianzanalysen mit Messwiederholung (ANOVA), T-Tests und Korrelationsanalysen gerechnet. Hierbei stellten die Variablen Kohärenz, Verzögerungszeit und Aufmerksamkeitsbedingung messwiederholte Faktoren bzw. Innersubjektfaktoren dar. Das Alter wurde als nicht messwiederholter Faktor oder Zwischensubjektfaktor behandelt.

Auch die erfassten Augendaten wurden in Matlab importiert und zunächst bezüglich horizontaler und vertikaler Abweichung vom Fixationspunkt ausgewertet und schließlich in SPSS auf Gruppeneffekte hin untersucht. Für beide Experimente wurden analog der untersuchten Wahrnehmungsparameter Varianzanalysen errechnet, um eventuelle Zusammenhänge zwischen dem Fixationsverhalten und den ermittelten Wahrnehmungsleistungen zu erkennen.

Alle Grafiken wurden zunächst in SPSS oder Microsoft Excel 2010 erstellt und mit Adobe Illustrator CC 2015 überarbeitet.

3. Ergebnisse

In den beiden vorliegenden Psychophysikexperimenten wurde die Auswirkung des Alters auf die visuelle Bewegungsklassifikationsfähigkeit untersucht. Hierzu wurde ein Telexperiment zur räumlichen Aufmerksamkeit und ein weiteres zur merkmalsbasierten Aufmerksamkeit durchgeführt. In den Experimenten wurden verschiedene Einflussfaktoren, wie die Aufmerksamkeitsbedingung, die Signalstärke und der zeitliche Ablauf experimentell variiert.

3.1 Experiment zur räumlichen Aufmerksamkeit mit Erfassung der perzeptuellen Entscheidungssicherheit

Im ersten Teil des vorliegenden Psychophysikexperiments zur räumlichen Aufmerksamkeit wurde untersucht, wie sich das Alter auf die Fähigkeit, visuelle Bewegungsrichtungen korrekt zu diskriminieren und auf die subjektive Sicherheit, mit welcher der Proband seine getroffene Entscheidung als richtig erachtet (perzeptuelle Entscheidungssicherheit) auswirkt. Zudem wurde analysiert, wie gut objektive Wahrnehmungsleistung und subjektive Entscheidungssicherheit übereinstimmen. Das hierfür erfasste Maß ist die metakognitive Sensitivität. Da visuelle Wahrnehmungsleistungen kritisch von selektiver Aufmerksamkeit abhängen, wurden in diesem ersten Experiment Auswirkungen des Alters auf räumliche Aufmerksamkeit untersucht. Im zweiten Experiment wurde untersucht, ob das Alter einen Einfluss auf merkmalsbasierte Aufmerksamkeit hat.

Die statistische Analyse erfolgt über gemischte ANOVAs mit Messwiederholung. Hierbei stellen die untersuchten Wahrnehmungsdomänen (objektiver Diskriminationserfolg, perzeptuelle Entscheidungssicherheit und metakognitive Sensitivität) jeweils die abhängige Variable dar. Für jede Wahrnehmungsdomäne wurden zwei gemischte ANOVAs berechnet. Eine mit den unabhängigen Variablen Aufmerksamkeitsbedingung, Verzögerungsintervall und Altersgruppe sowie eine zweite mit den unabhängigen Variablen Kohärenzstufe und Altersgruppe. Die Altersgruppenzugehörigkeit wurde als Zwischensubjektfaktor behandelt, die

Aufmerksamkeitsbedingung, das Verzögerungsintervall und die Kohärenzstufe als Innersubjektfaktoren.

Um zu untersuchen, ob sich der Effekt selektiver Aufmerksamkeit mit dem Alter verändert, wurde dann für jede der drei Wahrnehmungsdomänen ein Aufmerksamkeitseffekt errechnet, der den jeweiligen Unterschied zwischen valider und invalider Aufmerksamkeitsbedingung quantifiziert (vgl. hierzu Kapitel 2.3). Um die Unterschiede zwischen den Gruppen in Bezug auf diesen parametrisierten Aufmerksamkeitseffekt statisch zu vergleichen, wurde eine ergänzende univariate ANOVA mit dem parametrisierten Aufmerksamkeitseffekt als abhängige Variable und der Altersgruppe als unabhängige Variable berechnet. Auch hier wurde die Altersgruppe als Zwischensubjektfaktor, der parametrisierte Aufmerksamkeitseffekt als Innersubjektfaktor behandelt. Im Folgenden werden die Einflüsse der unterschiedlichen unabhängigen Variablen auf die jeweilige abhängige Variable gezeigt.

Von den 50 Probanden mussten im ersten Experiment zwei Probanden aus Altersgruppe 3 aus der statistischen Analyse ausgeschlossen werden, da die gemessenen Verhaltensdaten jeweils mehr als zwei Standardabweichungen vom Mittelwert der Referenzgruppe abwichen und somit Kriterien von Ausreißern aufwiesen.

3.1.1 Objektive Diskriminationsfähigkeit der globalen Bewegungsrichtung

Die objektive Diskriminationsleistung nahm mit steigendem Alter kontinuierlich ab. Abbildung 4 zeigt die mittlere Häufigkeit korrekt erkannter globaler Bewegungsreize in Abhängigkeit von der Altersgruppe und für alle experimentellen Bedingungen, d. h. Ergebnisse für die verschiedenen Kohärenzstufen, Aufmerksamkeitsbedingungen und Zeitläufe wurden gepoolt. Die Unterschiede der objektiven Leistung zwischen den Altersgruppen waren statistisch signifikant ($p = 0,006$; $F(4, 43) = 4,195$).

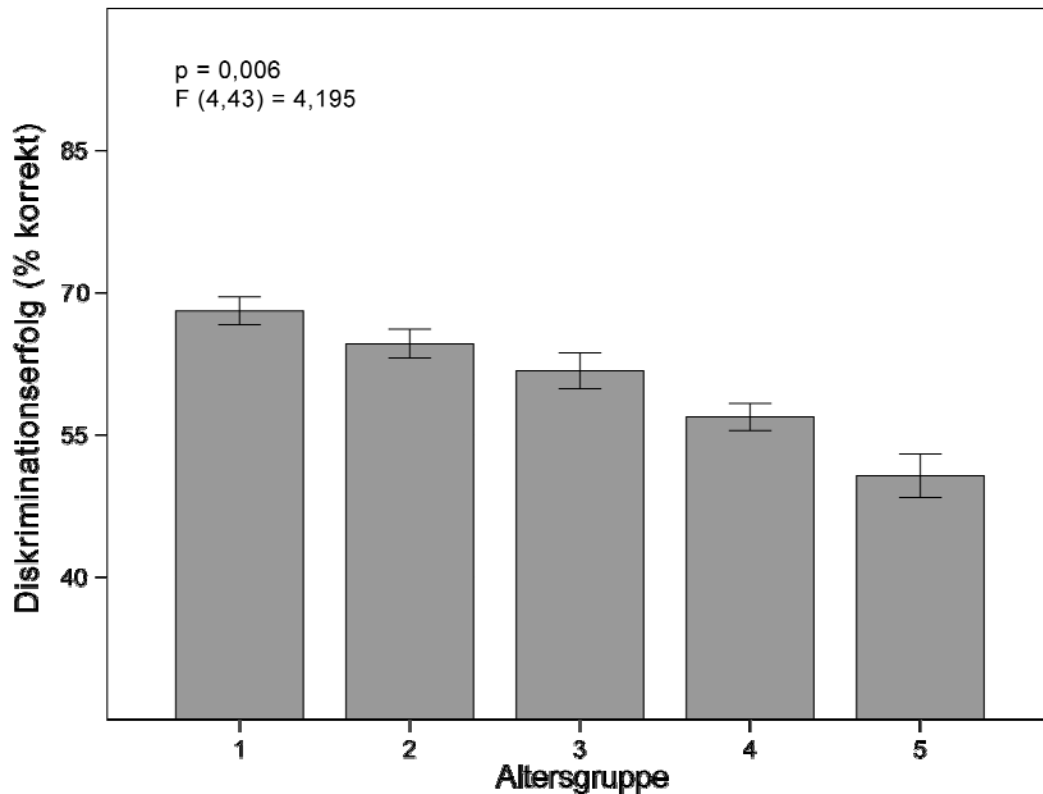


Abbildung 4: Darstellung des Diskriminationserfolgs (prozentualer Anteil korrekt erkannter Reize dividiert durch die Gesamtanzahl aller Einzeldurchgänge +/- ein Standardfehler des Mittelwertes) für jede Altersgruppe (Altersgruppe 1: Probanden zwischen 20 und 29 Jahren, Altersgruppe 2: Probanden zwischen 30 und 39 Jahren, Altersgruppe 3: Probanden zwischen 40 und 49 Jahren, Altersgruppe 4: Probanden zwischen 50 und 59 Jahren, Altersgruppe 5: Probanden zwischen 60 und 69 Jahren). Alle experimentellen Bedingungen wurden gepoolt. Es zeigt sich eine kontinuierliche Abnahme des objektiven Diskriminationserfolgs mit dem Alter. Statistisch unterschieden sich die Altersgruppen signifikant voneinander ($p = 0,006$; $F(4, 43) = 4,195$).

Abbildung 5 zeigt für jede Altersgruppe den Diskriminationserfolg in Abhängigkeit der präsentierten Kohärenzstufe (5, 20, 50 oder 100 % Kohärenz). In jeder Altersgruppe wird erwartungsgemäß eine Zunahme des Diskriminationserfolgs mit zunehmender Kohärenz deutlich. Statistisch unterschied sich entsprechend der Diskriminationserfolg zwischen den Kohärenzstufen signifikant ($p < 0,001$; $F(3, 129) = 384,083$). Ferner ergab sich eine signifikante Interaktion zwischen der Altersgruppe und der Kohärenzstufe ($p = 0,042$; $F(12, 129) = 1,886$), was darauf hindeutet, dass der Effekt der Altersgruppe bei den unterschiedlichen Kohärenzstufen unterschiedlich stark ins Gewicht fällt. Dieser Eindruck bestätigt

sich bei genauerer Betrachtung der Abbildung 5, insofern zum Beispiel die schwierige Kohärenzstufe 20 % sehr deutlich vom Alter abhängt, während die Ergebnisse für den einfachsten Reiz mit 100 % Kohärenz auch im Alter vergleichsweise hoch bleiben.

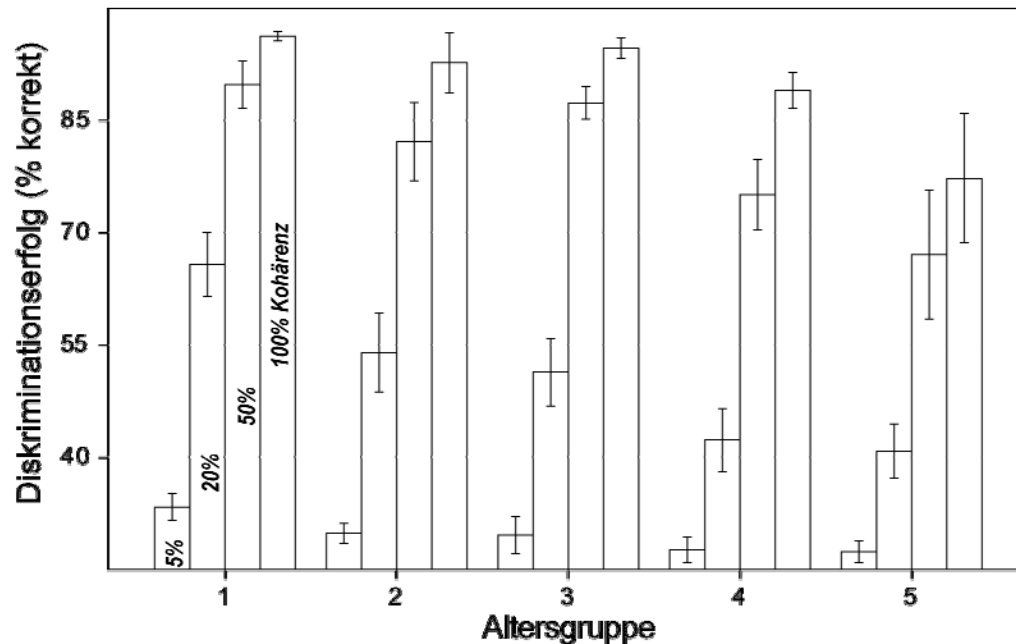


Abbildung 5: Darstellung des Diskriminationserfolgs (prozentualer Anteil korrekt erkannter Reize dividiert durch die Gesamtanzahl aller Einzeldurchgänge +/- ein Standardfehler des Mittelwertes) für jede Altersgruppe (Altersgruppe 1: Probanden zwischen 20 und 29 Jahren, Altersgruppe 2: Probanden zwischen 30 und 39 Jahren, Altersgruppe 3: Probanden zwischen 40 und 49 Jahren, Altersgruppe 4: Probanden zwischen 50 und 59 Jahren, Altersgruppe 5: Probanden zwischen 60 und 69 Jahren) und jede präsentierte Kohärenzstufe (5; 20; 50 oder 100 % Kohärenz). Es zeigt sich eine Zunahme des Diskriminationserfolgs mit zunehmender Kohärenz in jeder Altersgruppe. Die Kohärenzstufe hatte also erwartungsgemäß einen signifikanten Einfluss auf die Diskriminationsleistung ($p < 0,001$; $F(3, 129) = 384,083$). Weiterhin zeigt sich eine Abnahme des Diskriminationserfolgs bei gleicher Kohärenz mit zunehmendem Alter. Statistisch ergab sich eine signifikante Interaktion zwischen der Altersgruppe und der Kohärenzstufe ($p = 0,042$; $F(12, 129) = 1,886$).

Abbildung 6 zeigt die Diskriminationsleistungen der Altersgruppen in Abhängigkeit der Aufmerksamkeitsbedingung. Wie erwartet unterschied sich der Diskriminationserfolg zwischen Durchgängen mit valider Aufmerksamkeitsbedingung

signifikant von Durchgängen mit invalider Aufmerksamkeitsbedingung ($p < 0,001$; $F(1, 43) = 28,825$) und war bei valider Aufmerksamkeit jeweils höher. Mit anderen Worten, bei korrekt ausgerichteter Aufmerksamkeit fiel es den Probanden leichter, die globale Bewegungsrichtung korrekt zu erkennen. Dieser Effekt bleibt bis ins hohe Alter erhalten und zeigte sich innerhalb jeder Altersgruppe. Eine signifikante Interaktion zwischen der Altersgruppe und der Aufmerksamkeitsbedingung hingegen ergab sich nicht ($p = 0,161$; $F(4, 43) = 1,728$), auch im Alter also konnten die Probanden ihre Wahrnehmungsleistung durch räumliche Aufmerksamkeit signifikant verbessern.

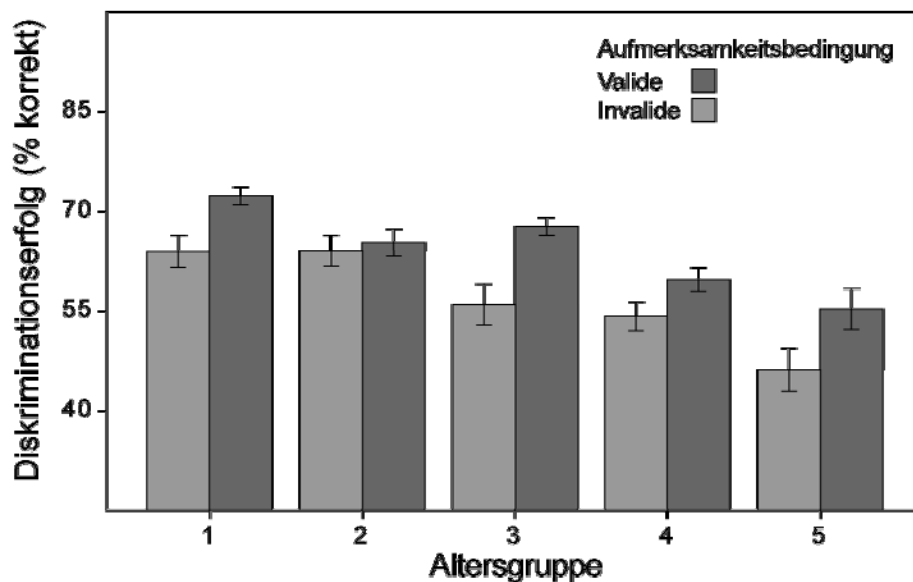


Abbildung 6: Darstellung des Diskriminationserfolgs (prozentualer Anteil korrekt erkannter Reize dividiert durch die Gesamtanzahl aller Einzeldurchgänge +/- ein Standardfehler des Mittelwertes) in Abhängigkeit von der Aufmerksamkeitsbedingung und der Altersgruppe (Altersgruppe 1: Probanden zwischen 20 und 29 Jahren, Altersgruppe 2: Probanden zwischen 30 und 39 Jahren, Altersgruppe 3: Probanden zwischen 40 und 49 Jahren, Altersgruppe 4: Probanden zwischen 50 und 59 Jahren, Altersgruppe 5: Probanden zwischen 60 und 69 Jahren). Es zeigt sich, dass bei valider Aufmerksamkeitsbedingung in jeder Gruppe die objektive Leistung besser war als bei invalider Aufmerksamkeitsbedingung. Die Unterschiede des Diskriminationserfolgs zwischen den Aufmerksamkeitsbedingungen waren entsprechend statistisch signifikant ($p < 0,001$; $F(1, 43) = 28,825$). Eine signifikante Interaktion zwischen der Altersgruppe und der Aufmerksamkeitsbedingung hingegen ergab sich nicht ($p = 0,161$; $F(4, 43) = 1,728$).

Der perzeptuelle Benefit valide ausgerichteter Aufmerksamkeit gegenüber invalide ausgerichteter Aufmerksamkeit ist noch einmal in Abbildung 7 dargestellt. Hier ist die Differenz des Diskriminationserfolges zwischen den beiden Bedingungen dargestellt – normiert auf den Diskriminationserfolg bei valider Ausrichtung. Ein Wert von 0,2 zeigt somit eine um 20 % bessere Diskrimination in der validen gegenüber der invaliden Aufmerksamkeitsbedingung an. In allen Altersgruppen zeigt sich ein positiver Aufmerksamkeitseffekt. Statistisch unterschieden sich die Gruppen hinsichtlich des Aufmerksamkeitseffektes nicht signifikant ($p = 0,327$; $F(4, 43) = 1,194$). Eine Altersabhängigkeit des Aufmerksamkeitseffektes für die objektive Diskriminationsleistung konnte somit nicht belegt werden.

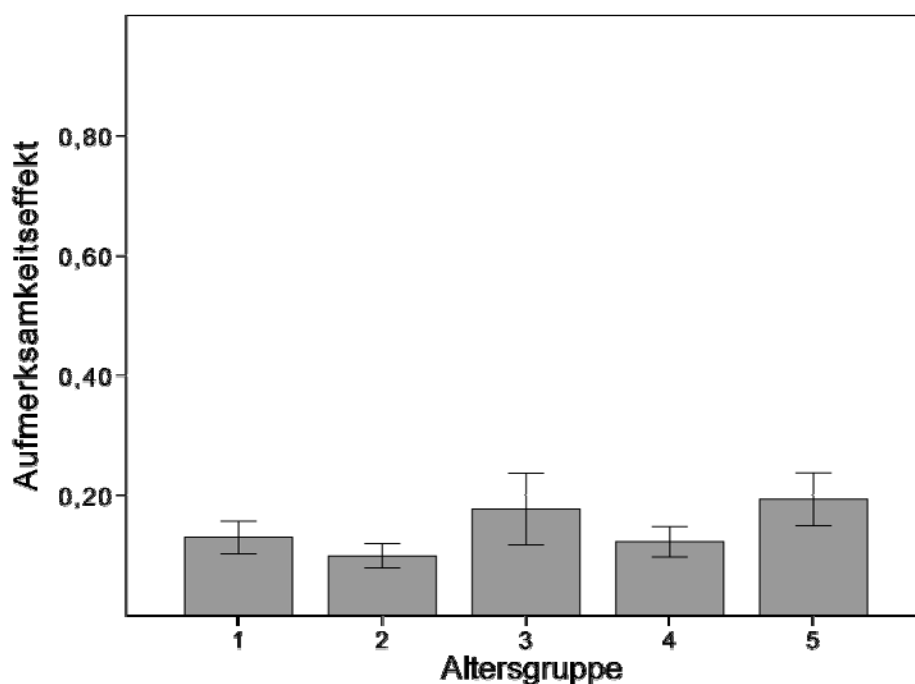


Abbildung 7: Darstellung des parametrisierten Aufmerksamkeitseffekts (Mittelwerte +/- ein Standardfehler des Mittelwertes) für jede Altersgruppe (Altersgruppe 1: Probanden zwischen 20 und 29 Jahren, Altersgruppe 2: Probanden zwischen 30 und 39 Jahren, Altersgruppe 3: Probanden zwischen 40 und 49 Jahren, Altersgruppe 4: Probanden zwischen 50 und 59 Jahren, Altersgruppe 5: Probanden zwischen 60 und 69 Jahren). Statistisch unterschieden sich die Altersgruppen hinsichtlich des Aufmerksamkeitseffekts nicht signifikant ($p = 0,327$; $F(4, 43) = 1,194$).

Die folgenden beiden Abbildungen zeigen die Zusammenhänge zwischen dem Diskriminationserfolg, der Verzögerungsdauer (zwischen Abschluss der Präsentation des Bewegungsreizes und Darbietung des Instruktionsreizes), der Altersgruppe und der Aufmerksamkeitsbedingung. Abbildung 8 zeigt den Diskriminationserfolg zunächst in Abhängigkeit der zugehörigen Altersgruppe und für die drei Verzögerungsstufen. Es ist auch hier wieder der Einfluss des Alters offensichtlich. Relevante Unterschiede für die unterschiedlichen Zeitgänge der Stimulation liegen jedoch nicht vor. Sowohl der Einfluss der zeitlichen Reizverzögerung ($p = 0,659$; $F(2, 86) = 0,419$) und eine Interaktion zwischen diesem Faktor und dem Alter waren statistisch nicht signifikant ($p = 0,619$; $F(8, 86) = 0,782$).

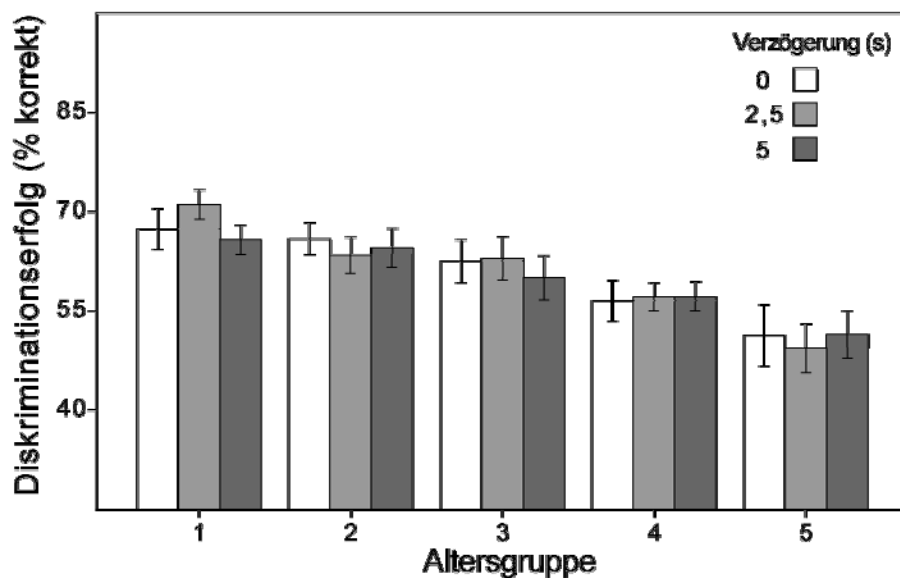


Abbildung 8: Darstellung des Diskriminationserfolgs (prozentualer Anteil korrekt erkannter Reize dividiert durch die Gesamtanzahl aller Einzeldurchgänge +/- ein Standardfehler des Mittelwertes) für jede Altersgruppe (Altersgruppe 1: Probanden zwischen 20 und 29 Jahren, Altersgruppe 2: Probanden zwischen 30 und 39 Jahren, Altersgruppe 3: Probanden zwischen 40 und 49 Jahren, Altersgruppe 4: Probanden zwischen 50 und 59 Jahren, Altersgruppe 5: Probanden zwischen 60 und 69 Jahren), getrennt für die drei Verzögerungsstufen (0; 2,5 oder 5 s Verzögerung). Ein statistisch signifikanter Zusammenhang zwischen Diskriminationsleistung und Verzögerungsstufe konnte nicht gezeigt werden ($p = 0,659$; $F(2, 86) = 0,419$). Auch ergab sich keine signifikante Interaktion zwischen Diskriminationserfolg, Verzögerungsstufe und Altersgruppe ($p = 0,619$; $F(8, 86) = 0,782$).

Abbildung 9 stellt die Diskriminationsleistung für die drei Verzögerungsstufen und für beide Aufmerksamkeitsbedingungen dar. Es wird ersichtlich, dass für alle drei Verzögerungsstufen die objektive Leistung innerhalb der gegebenen Aufmerksamkeitsbedingung annähernd identisch war. Entsprechend ergaben sich bezüglich der Verzögerungsdauer zwischen zu bewertendem Stimulus und Richtungsabfrage keine statistisch signifikanten Einflüsse auf die objektive Diskriminationsfähigkeit ($p = 0,659$; $F(2, 86) = 0,419$). Auch ergab sich keine signifikante Interaktion zwischen Diskriminationserfolg, Verzögerungsdauer und Aufmerksamkeitsbedingung ($p = 0,427$; $F(2, 86) = 0,860$). Es kann daher festgehalten werden, dass die Verzögerungsdauer für beide Aufmerksamkeitsbedingungen und alle Altersgruppen keinen signifikanten Einfluss auf die Diskriminationsleistung hatte.

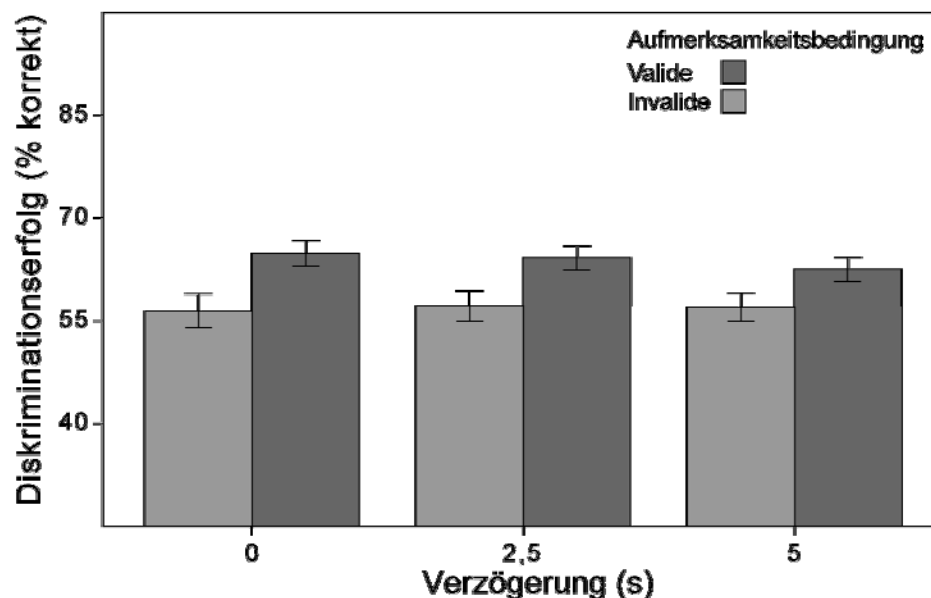


Abbildung 9: Darstellung des Diskriminationserfolgs (prozentualer Anteil korrekt erkannter Reize dividiert durch die Gesamtanzahl aller Einzeldurchgänge +/- ein Standardfehler des Mittelwertes) für die drei Verzögerungsstufen (0; 2,5 oder 5 s Verzögerung) und in Abhängigkeit der Aufmerksamkeitsbedingung. Es wird deutlich, dass die Verzögerungsdauer keinen statistisch signifikanten Einfluss auf die objektive Diskriminationsfähigkeit hatte ($p = 0,659$; $F(2, 86) = 0,419$) und auch nicht mit der Aufmerksamkeitsbedingung interagierte ($p = 0,427$; $F(2, 86) = 0,860$).

Zusammenfassend ergab die abschließende gemischte ANOVA mit Messwiederholung mit den drei Variablen Verzögerungsdauer und Aufmerksamkeitsbedingung als Innersubjektfaktoren sowie Altersgruppe als Zwischensubjektfaktor signifikante Einflüsse der Aufmerksamkeitsbedingung ($p < 0,001$; $F(1, 43) = 28,825$) und der Altersgruppe ($p = 0,006$; $F(4, 43) = 4,195$), nicht jedoch der Verzögerungsdauer ($p = 0,659$; $F(2, 86) = 0,419$).

Signifikante Interaktionen zwischen den drei untersuchten Variablen ergaben sich nicht.

3.1.2 Perzeptuelle, subjektive Entscheidungssicherheit

Neben den Abhängigkeiten der objektiven Diskriminationsleistung lag im vorliegenden Experiment das besondere Interesse auf der perzeptuellen Entscheidungssicherheit, also der Sicherheit, mit welcher der Proband seine Bewertung als richtig annahm. Die Ergebnisse werden im Folgenden anhand des Entscheidungssicherheitsindex dargestellt, der wie die Diskriminationsleistung Ausprägungen zwischen 0,25 und 1,0 einnehmen konnte.

In Bezug auf die Entscheidungssicherheit ergaben sich ähnliche Ergebnisse wie für die objektive visuelle Wahrnehmungsleistung: Abbildung 10 zeigt, dass mit zunehmendem Alter das Vertrauen in die eigene Leistung analog zur tatsächlich erbrachten Leistung kontinuierlich abnahm. Der Einfluss der Altersgruppenzugehörigkeit auf die Entscheidungssicherheit war statistisch signifikant ($p = 0,024$; $F(4, 43) = 3,128$). Eine besonders deutliche Differenz zu den anderen Altersgruppen, d. h. eine besonders deutliche Abnahme der perzeptuellen Entscheidungssicherheit, ergibt sich augenscheinlich für Altersgruppe 5. Hier bricht die subjektive Entscheidungssicherheit im Vergleich zu den anderen Altersgruppen am deutlichsten ein.

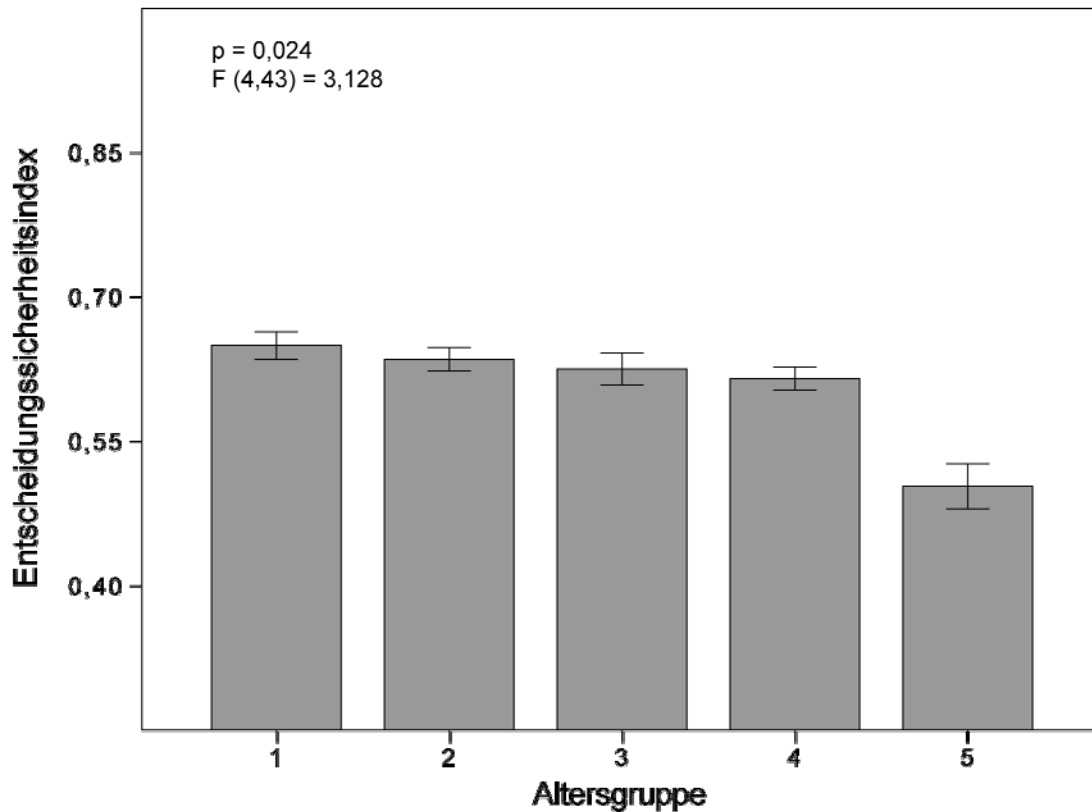


Abbildung 10: Darstellung des Entscheidungssicherheitsindex +/- ein Standardfehler des Mittelwertes in Abhängigkeit der Altersgruppe (Altersgruppe 1: Probanden zwischen 20 und 29 Jahren, Altersgruppe 2: Probanden zwischen 30 und 39 Jahren, Altersgruppe 3: Probanden zwischen 40 und 49 Jahren, Altersgruppe 4: Probanden zwischen 50 und 59 Jahren, Altersgruppe 5: Probanden zwischen 60 und 69 Jahren). Analog zur objektiv erbrachten Wahrnehmungsleistung zeigte sich eine statistisch signifikante Abnahme des Entscheidungssicherheitsindex mit dem Alter ($p = 0,024$; $F(4, 43) = 3,128$).

Abbildung 11 zeigt die Abhängigkeit der Entscheidungssicherheit von der präsentierten Kohärenzstufe für jede Altersgruppe getrennt. In allen Altersgruppen verbesserte sich die Entscheidungssicherheit mit steigender Kohärenz. In anderen Worten, je einfacher die Wahrnehmungsaufgabe war, desto sicherer waren sich die Probanden der Richtigkeit ihrer Entscheidung. Statistisch ergab sich, den Erwartungen entsprechend und wie aus Vorgängerstudien bekannt, ein signifikanter Einfluss der Kohärenzstufe auf die Entscheidungssicherheit ($p < 0,001$; $F(3, 129) = 457,646$). Weiterhin zeigte sich, wie auch für die objektive Leistung, dass die Altersabhängigkeit der subjektiven Entscheidungssicherheit für die verschiedenen Kohärenzen unterschiedlich stark ausgeprägt war.

Statistisch ergab sich ebenso eine signifikante Interaktion zwischen der Kohärenz und der Altersgruppe in Bezug auf die Entscheidungssicherheit ($p = 0,017$; $F(12, 129) = 2,167$).

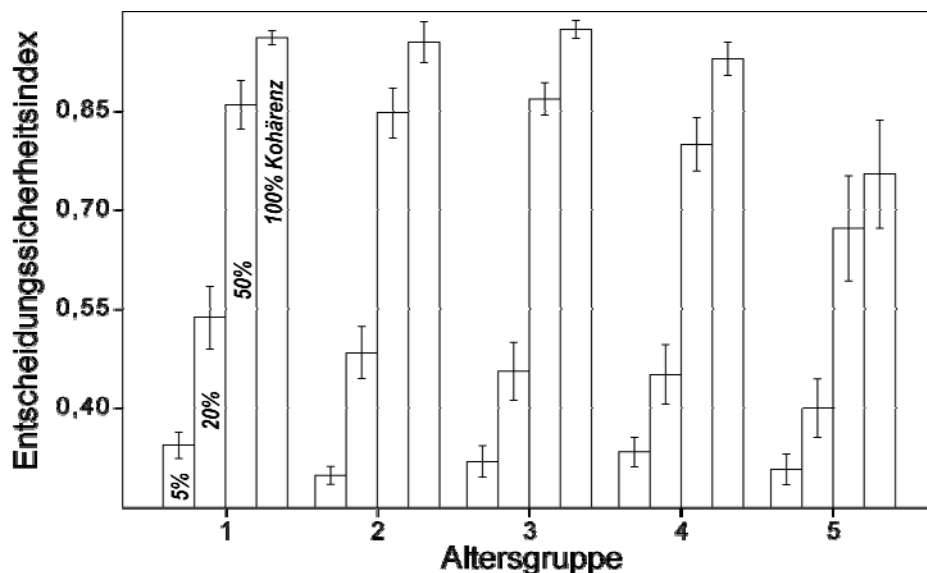


Abbildung 11: Darstellung des Entscheidungssicherheitsindex +/- ein Standardfehler des Mittelwertes für jede präsentierte Kohärenzstufe (5; 20; 50 oder 100 % Kohärenz) und jede Altersgruppe (Altersgruppe 1: Probanden zwischen 20 und 29 Jahren, Altersgruppe 2: Probanden zwischen 30 und 39 Jahren, Altersgruppe 3: Probanden zwischen 40 und 49 Jahren, Altersgruppe 4: Probanden zwischen 50 und 59 Jahren, Altersgruppe 5: Probanden zwischen 60 und 69 Jahren). In jeder Gruppe zeigte sich, dass bei höherer Kohärenz die Entscheidungssicherheit besser war als bei niedrigerer Kohärenz. Der Entscheidungssicherheitsindex unterschied sich zwischen den Kohärenzstufen signifikant ($p < 0,001$; $F(3, 129) = 457,646$). Wie beim objektiven Diskriminationserfolg nahm auch die Entscheidungssicherheit mit dem Alter ab. Die Interaktion zwischen der Kohärenzstufe und der Altersgruppe war statistisch signifikant ($p = 0,017$; $F(12, 129) = 2,167$).

In Abbildung 12 wird die Abhängigkeit der subjektiven Entscheidungssicherheit von der jeweiligen Aufmerksamkeitsbedingung dargestellt. Es wird ersichtlich, dass die perzeptuelle Entscheidungssicherheit bei valide geführter Aufmerksamkeitsbedingung stets höher war als bei invalide geführter Aufmerksamkeit. Die Probanden waren folglich bei korrekt ausgerichteter Aufmerksamkeit sicherer in ihrer Entscheidung. Dieser Effekt, also der Unterschied des Entschei-

Entscheidungssicherheitsindex zwischen den Aufmerksamkeitsbedingungen, war statistisch hoch signifikant ($p < 0,001$; $F(1, 43) = 28,051$) und zeigte sich in jeder Altersgruppe. Eine signifikante Interaktion zwischen Altersgruppe und Aufmerksamkeitsbedingung ergab sich hingegen nicht ($p = 0,358$; $F(4, 43) = 1,124$).

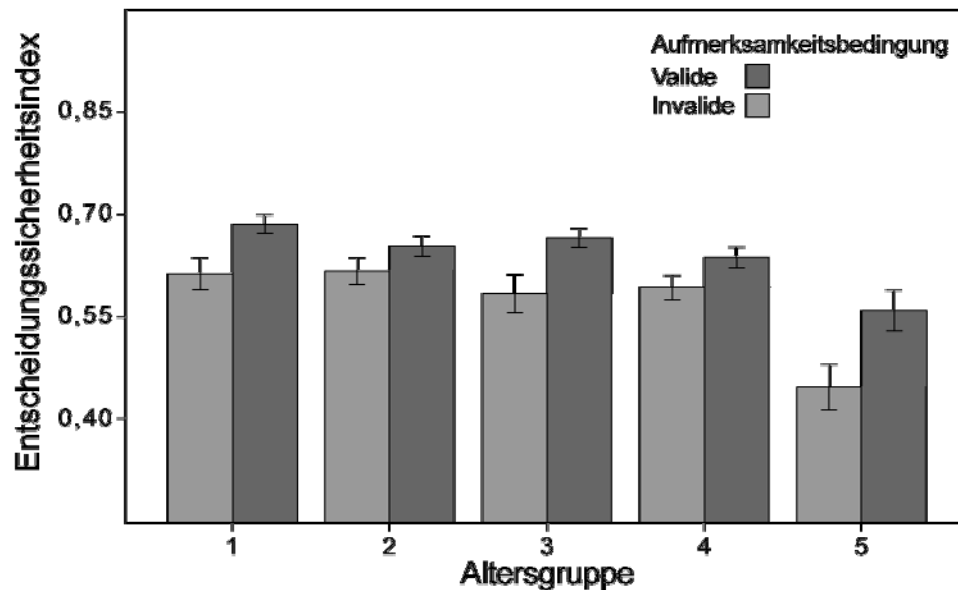


Abbildung 12: Darstellung des Entscheidungssicherheitsindex \pm ein Standardfehler des Mittelwertes in Abhängigkeit von der Aufmerksamkeitsbedingung und der Altersgruppe (Altersgruppe 1: Probanden zwischen 20 und 29 Jahren, Altersgruppe 2: Probanden zwischen 30 und 39 Jahren, Altersgruppe 3: Probanden zwischen 40 und 49 Jahren, Altersgruppe 4: Probanden zwischen 50 und 59 Jahren, Altersgruppe 5: Probanden zwischen 60 und 69 Jahren). In jeder Altersgruppe gelang die Bewertung der eigenen Wahrnehmungsleistung besser bei valider Aufmerksamkeitsbedingung als bei invalider Aufmerksamkeitsbedingung ($p < 0,001$; $F(1, 43) = 28,051$). Eine signifikante Interaktion zwischen der Aufmerksamkeitsbedingung und der Altersgruppe ergab sich nicht ($p = 0,385$; $F(4, 43) = 1,124$).

Analog zur Diskriminationsleistung wurde auch für die perzeptuelle Entscheidungssicherheit der Aufmerksamkeitseffekt parametrisiert (Differenz zwischen valider und invalider Aufmerksamkeitsbedingung normiert auf die valide Bedingung). Die Ergebnisse der Gruppen wurden mittels univariater ANOVA miteinander verglichen.

Abbildung 13 zeigt den Aufmerksamkeitseffekt auf die Entscheidungssicherheit für die fünf Altersgruppen. Dieser ist jeweils ähnlich groß und in allen Gruppen positiv. Eine ANOVA zeigte den Einfluss des Faktors Altersgruppe als nicht statistisch signifikant ($p = 0,152$; $F(4, 43) = 1,772$).

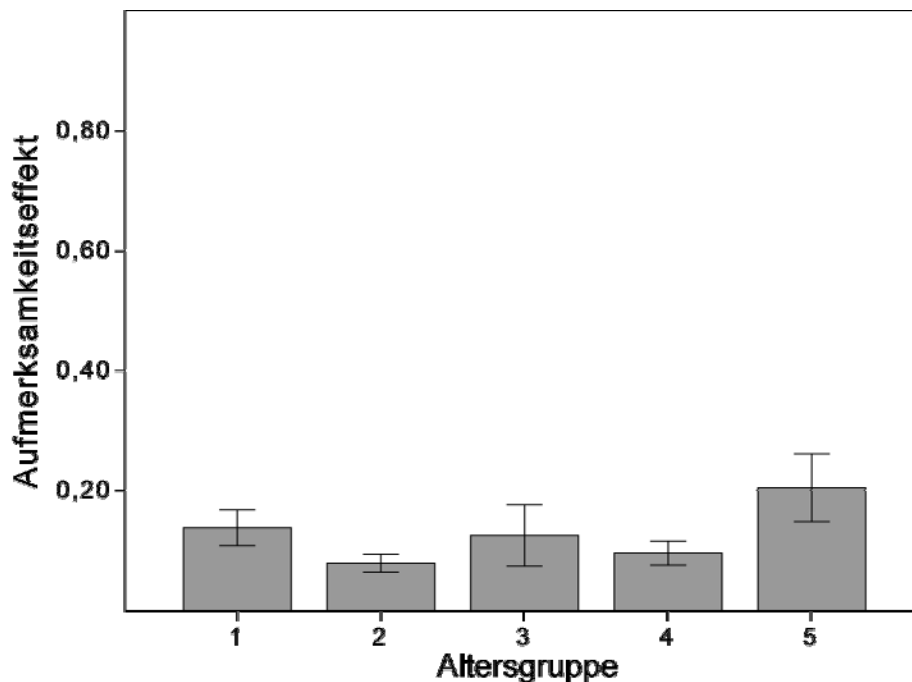


Abbildung 13: Darstellung des parametrisierten Aufmerksamkeitseffekts in der Domäne perzeptuelle Entscheidungssicherheit +/- ein Standardfehler des Mittelwertes in Abhängigkeit des Alters (Altersgruppe 1: Probanden zwischen 20 und 29 Jahren, Altersgruppe 2: Probanden zwischen 30 und 39 Jahren, Altersgruppe 3: Probanden zwischen 40 und 49 Jahren, Altersgruppe 4: Probanden zwischen 50 und 59 Jahren, Altersgruppe 5: Probanden zwischen 60 und 69 Jahren). Statistisch unterschieden sich die Altersgruppen hinsichtlich des Aufmerksamkeitseffekts nicht signifikant ($p = 0,152$; $F(4, 43) = 1,772$).

Abbildung 14 zeigt für jede Altersgruppe die perzeptuelle Entscheidungssicherheit für die drei Verzögerungsstufen. Die Verzögerungsdauer zwischen zu bewertendem Stimulus und Abfragezeitpunkt nahm weder auf die objektive Diskriminationsleistung (s. o.) noch auf die perzeptuelle Entscheidungssicherheit einen signifikanten Einfluss ($p = 0,384$; $F(2, 86) = 0,968$). Entscheidungssi-

cherheit, Verzögerungsdauer und Altersgruppe interagierten hingegen auf schwachem Signifikanzniveau ($p = 0,045$, $F(8, 86) = 2,089$).

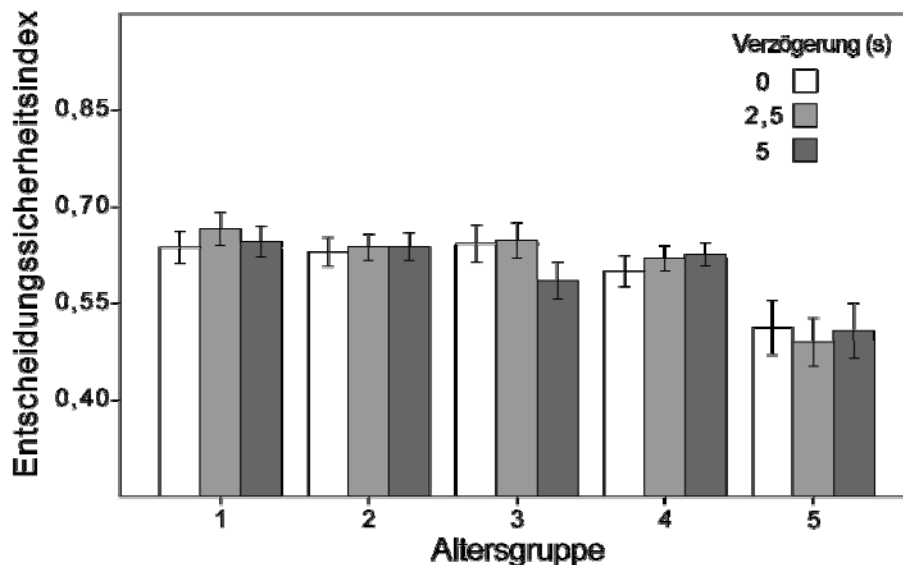


Abbildung 14: Darstellung des Entscheidungssicherheitsindex +/- ein Standardfehler des Mittelwertes für jede Altersgruppe (Altersgruppe 1: Probanden zwischen 20 und 29 Jahren, Altersgruppe 2: Probanden zwischen 30 und 39 Jahren, Altersgruppe 3: Probanden zwischen 40 und 49 Jahren, Altersgruppe 4: Probanden zwischen 50 und 59 Jahren, Altersgruppe 5: Probanden zwischen 60 und 69 Jahren) und in Abhängigkeit der Verzögerungsstufe (0; 2,5 oder 5 s). Ein signifikanter Einfluss der Verzögerungsstufe auf die Entscheidungssicherheit konnte nicht gezeigt werden ($p = 0,384$; $F(2, 86) = 0,968$). Es zeigte sich jedoch eine Interaktion zwischen den Variablen Verzögerungsstufe und Altersgruppe auf schwachem Signifikanzniveau ($p = 0,045$, $F(8, 86) = 2,089$).

Die Zusammenhänge zwischen perceptueller Entscheidungssicherheit, Verzögerungsintervall und Aufmerksamkeitsbedingung sind in Abbildung 15 gezeigt. Dargestellt sind jeweils die Entscheidungssicherheit bei valider Aufmerksamkeitsbedingung und die Entscheidungssicherheit bei invalider Aufmerksamkeitsbedingung, getrennt für die drei Verzögerungsstufen. Es wird deutlich, dass genau wie bei der objektiven Diskriminationsleistung auch die perceptuelle Entscheidungssicherheit für alle drei Verzögerungsstufen für die gegebene Aufmerksamkeitsbedingung annähernd identisch war und somit die Verzögerungsstufe keinen signifikanten Einfluss auf die subjektive perceptuelle Entscheidungssicherheit hatte.

Entscheidungssicherheit hatte ($p = 0,384$; $F(2, 86) = 0,968$). Auch ergab sich keine signifikante Interaktion zwischen Aufmerksamkeitsbedingung und Verzögerungsstufe ($p = 0,891$; $F(2, 86) = 0,116$).

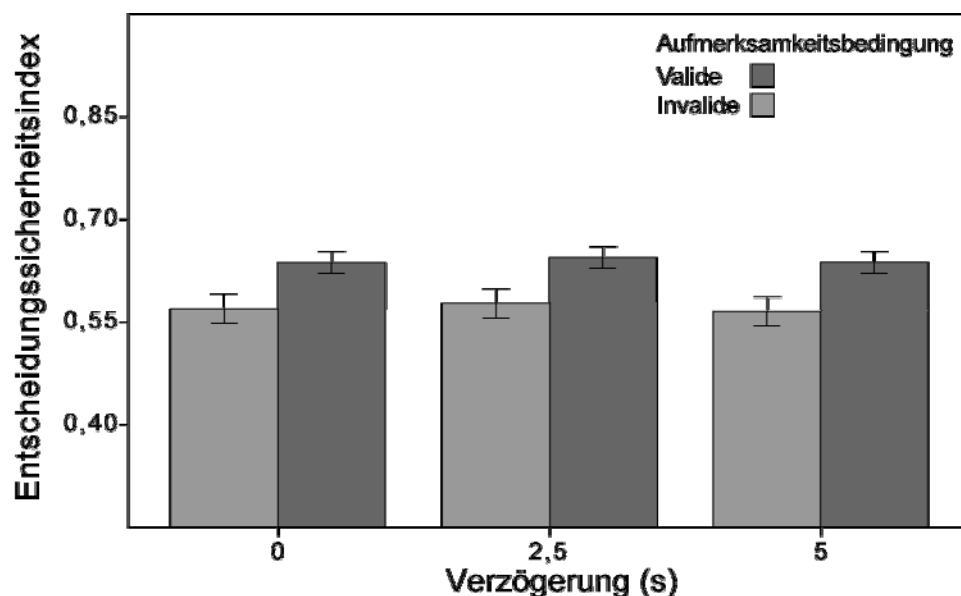


Abbildung 15: Darstellung des Entscheidungssicherheitsindex +/- ein Standardfehler des Mittelwertes für die drei Verzögerungsstufen (0; 2,5 oder 5 s), getrennt für die beiden Aufmerksamkeitsbedingungen. Signifikante Unterschiede der Entscheidungssicherheit zwischen den Verzögerungsstufen ergaben sich nicht ($p = 0,384$; $F(2, 86) = 0,968$). Auch ergab sich keine signifikante Interaktion zwischen Aufmerksamkeitsbedingung und Verzögerungsstufe ($p = 0,891$; $F(2, 86) = 0,116$).

Zusammenfassend waren die Ergebnisse in allen Punkten deckungsgleich zu denen der Diskriminationsleistung. Auch hier waren die Effekte der Aufmerksamkeitsbedingung ($p < 0,001$; $F(1, 43) = 28,05$) sowie der Einfluss der Altersgruppe ($p = 0,024$; $F(4, 43) = 3,128$) statistisch signifikant. Die Verzögerungsdauer hingegen nahm auch auf die Entscheidungssicherheit keinen signifikanten Einfluss ($p = 0,384$; $F(2, 86) = 0,968$).

Weiterhin zeigte sich eine statistisch schwach signifikante Interaktion zwischen der Verzögerungsdauer und der Altersgruppe ($p = 0,045$; $F(8, 86) = 2,089$).

3.1.3 Metakognitive Sensitivität

Bisher konnte gezeigt werden, dass sich die objektive visuelle Wahrnehmungsleistung und die subjektive Einschätzung der eigenen Leistung jeweils für sich betrachtet in Abhängigkeit vom Alter sehr ähnlich verhalten. Doch wie verhalten sie sich in Bezug zueinander? In einem abschließenden Schritt wurde analysiert, wie gut bzw. wie zutreffend die eigene metakognitive Bewertung der Probanden die tatsächliche objektiv erbrachte Wahrnehmungsleistung abbildete. Hierzu wurde als ein etabliertes Maß die sogenannte metakognitive Sensitivität auf Basis der Signalentdeckungstheorie errechnet.

Abbildung 16 zeigt die metakognitive Sensitivität für jede Altersgruppe und über alle experimentellen Bedingungen gepoolt. Es bestand ein Maximum der metakognitiven Sensitivität für die mittleren Altersgruppen (2 und 3), bei Probanden mittleren Alters stimmen somit die subjektive Einschätzung der eigenen Leistung und die objektiv erbrachte Leistung am besten überein, im Alter nehmen sie ab. Statistisch bestätigte sich ein signifikanter Einfluss der Altersgruppe auf die metakognitive Sensitivität ($p = 0,001$; $F(4, 43) = 5,674$).

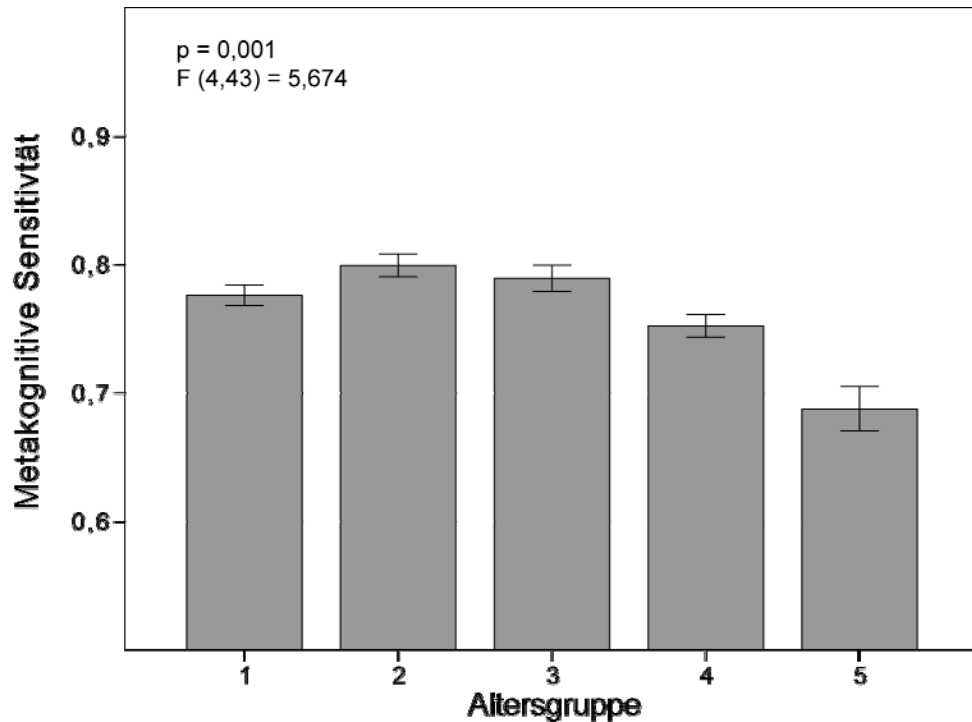


Abbildung 16: Darstellung der metakognitiven Sensitivität +/- ein Standardfehler des Mittelwertes in Abhängigkeit von der Altersgruppe (Altersgruppe 1: Probanden zwischen 20 und 29 Jahren, Altersgruppe 2: Probanden zwischen 30 und 39 Jahren, Altersgruppe 3: Probanden zwischen 40 und 49 Jahren, Altersgruppe 4: Probanden zwischen 50 und 59 Jahren, Altersgruppe 5: Probanden zwischen 60 und 69 Jahren). Die höchste metakognitive Sensitivität, d. h. maximale Übereinstimmung zwischen objektiver und subjektiver Leistung, zeigte sich für die beiden mittleren Altersgruppen 2 und 3. Die Abhängigkeit der metakognitiven Sensitivität von der Altersgruppe war statistisch signifikant ($p = 0,001$; $F(4, 43) = 5,674$).

Abbildung 17 zeigt die metakognitive Sensitivität der fünf Altersgruppen jeweils in Abhängigkeit der präsentierten Kohärenzstufe. Die metakognitive Sensitivität erreichte in allen fünf Altersgruppen ihren minimalen Wert bei einer Kohärenz von 5 %, also bei der schwierigsten Wahrnehmungsaufgabe. Bei einer sehr schwierigen Aufgabe stimmten also unabhängig vom Alter die objektive Diskriminationsleistung und die subjektive Entscheidungssicherheit am geringsten überein. Ein Maximum erreichte die metakognitive Sensitivität in Altersgruppe 2 bis 5 bei einer Kohärenz von 50 %. Hier schätzten die Probanden ihre Leistung also nicht, wie man erwarten könnte, bei der leichtesten Wahrnehmungsaufgabe am besten ein, sondern vielmehr im mittleren Schwierigkeitsbereich. Die metakognitive Sensitivität erreicht im mittleren Schwierigkeitsbereich eine Sätti-

gung. Bei 100 % Kohärenz kam es dann in fast allen Altersgruppen wieder zu einem Abfall der metakognitiven Sensitivität. Die jüngste Altersgruppe 1 erreichte hingegen ein Maximum bei einer Kohärenz von 100 %, wobei die Differenz zur 50 %-Stufe marginal erscheint. Der höchste Absolutwert für die metakognitive Sensitivität findet sich in Altersgruppe 3 bei einer Kohärenz von 50 %.

Statistisch unterschied sich die metakognitive Sensitivität zwischen den vier Kohärenzstufen signifikant ($p < 0,001$; $F(3, 129) = 60,864$), sodass festgehalten werden kann, dass alle drei untersuchten Wahrnehmungsdomänen vom Schwierigkeitsgrad der gestellten Aufgabe abhängig waren. Eine signifikante Interaktion zwischen der Altersgruppe und der Kohärenz hinsichtlich der metakognitiven Sensitivität konnte nicht gezeigt werden ($p = 0,367$, $F(12, 129) = 1,009$).

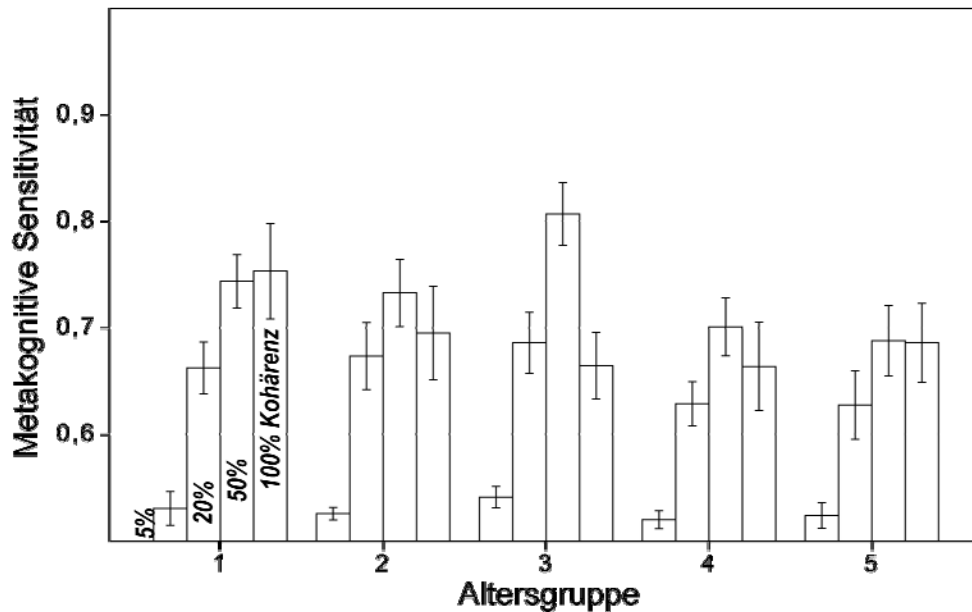


Abbildung 17: Darstellung der metakognitiven Sensitivität +/- ein Standardfehler des Mittelwertes für jede präsentierte Kohärenzstufe (5; 20; 50 oder 100 % Kohärenz) und jede Altersgruppe (Altersgruppe 1: Probanden zwischen 20 und 29 Jahren, Altersgruppe 2: Probanden zwischen 30 und 39 Jahren, Altersgruppe 3: Probanden zwischen 40 und 49 Jahren, Altersgruppe 4: Probanden zwischen 50 und 59 Jahren, Altersgruppe 5: Probanden zwischen 60 und 69 Jahren). Statistisch unterschied sich die metakognitive Sensitivität zwischen den vier Kohärenzstufen signifikant ($p < 0,001$; $F(3, 129) = 60,864$), eine signifikante Interaktion zwischen der Altersgruppe und der Kohärenzstufe in Bezug auf die metakognitive Sensitivität konnte hingegen nicht gezeigt werden ($p = 0,367$; $F(12, 129) = 1,009$).

In Abbildung 18 wird die metakognitive Sensitivität für die beiden Aufmerksamkeitsbedingungen getrennt für jede Altersgruppe dargestellt. Es wird ersichtlich, dass jeweils bei valider Aufmerksamkeitsbedingung die metakognitive Sensitivität höher war als bei invalider Aufmerksamkeitsbedingung, dass also die Einschätzung der eigenen erbrachten Leistung bei valider Aufmerksamkeitsbedingung präziser gelang als bei invalider Aufmerksamkeitsbedingung. Dieser Effekt zeigte sich in jeder Altersgruppe, besonders deutlich in Altersgruppe 5. Statistisch ergab sich hier ein signifikanter Zusammenhang zwischen der Aufmerksamkeitsbedingung und der metakognitiven Sensitivität ($p < 0,001$; $F(1, 43) = 16,568$). Eine Interaktion zwischen Aufmerksamkeitsbedingung und Altersgruppe zeigte sich trotz der tendenziellen Betonung des Effektes im Alter bei knapp verpasster Signifikanz nicht ($p = 0,089$; $F(4, 43) = 2,165$).

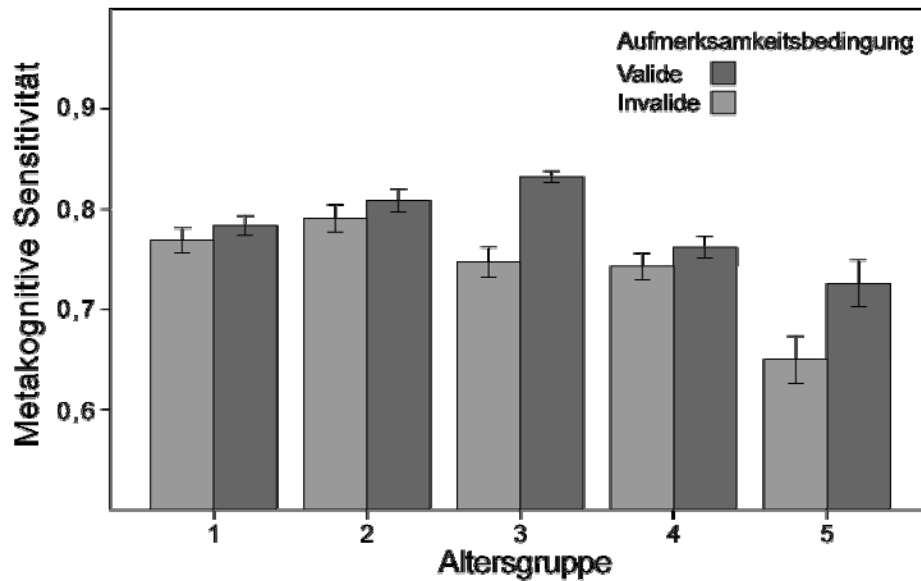


Abbildung 18: Darstellung der metakognitiven Sensitivität +/- ein Standardfehler des Mittelwertes für die beiden Aufmerksamkeitsbedingungen und die verschiedenen Altersgruppen (Altersgruppe 1: Probanden zwischen 20 und 29 Jahren, Altersgruppe 2: Probanden zwischen 30 und 39 Jahren, Altersgruppe 3: Probanden zwischen 40 und 49 Jahren, Altersgruppe 4: Probanden zwischen 50 und 59 Jahren, Altersgruppe 5: Probanden zwischen 60 und 69 Jahren). Es zeigte sich in jeder Altersgruppe eine bessere metakognitive Sensitivität bei valider Aufmerksamkeitsbedingung als bei invalider Aufmerksamkeitsbedingung. Statistisch ergaben sich hoch signifikante Unterschiede der metakognitiven Sensitivität in Abhängigkeit von der Aufmerksamkeitsbedingung ($p < 0,001$; $F(1, 43) = 16,568$). Eine signifikante Interaktion zwischen Aufmerksamkeitsbedingung und Altersgruppe zeigte sich nicht ($p = 0,089$; $F(4, 43) = 2,165$).

In Abbildung 19 ist der parametrisierte Aufmerksamkeitseffekt auf die metakognitive Sensitivität für die fünf Altersgruppen dargestellt. In allen Altersgruppen ist der Effekt positiv. Ein gering zunehmender Effekt selektiver visueller Aufmerksamkeit auf die metakognitive Sensitivität kommt mit zunehmendem Alter zur Darstellung. So zeigt sich der ausgeprägteste Aufmerksamkeitseffekt in der ältesten Gruppe 5, gefolgt von Altersgruppe 3. Anders als bei den beiden zuvor untersuchten Wahrnehmungsdomänen unterscheiden sich die Gruppen hinsichtlich des Effekts selektiver Aufmerksamkeit auf die metakognitive Sensitivität signifikant voneinander ($p = 0,030$; $F(4, 43) = 2,963$).

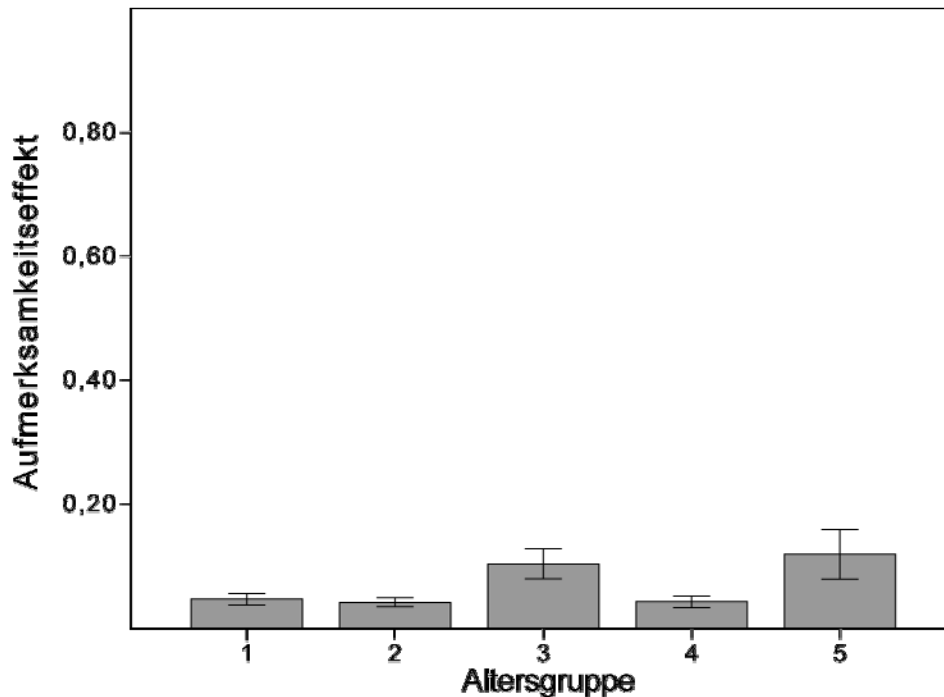


Abbildung 19: Darstellung des parametrisierten Aufmerksamkeitseffekts in der Domäne metakognitive Sensitivität +/- ein Standardfehler des Mittelwertes für jede Altersgruppe (Altersgruppe 1: Probanden zwischen 20 und 29 Jahren, Altersgruppe 2: Probanden zwischen 30 und 39 Jahren, Altersgruppe 3: Probanden zwischen 40 und 49 Jahren, Altersgruppe 4: Probanden zwischen 50 und 59 Jahren, Altersgruppe 5: Probanden zwischen 60 und 69 Jahren). Statistisch unterschieden sich die Altersgruppen hinsichtlich des Aufmerksamkeitseffekts in dieser Wahrnehmungsdomäne signifikant voneinander ($p = 0,030$; $F(4, 43) = 2,963$).

Die beiden folgenden Abbildungen, Abbildung 20 und Abbildung 21, zeigen die metakognitive Sensitivität in Abhängigkeit der Verzögerungsstufe. In Abbildung 20 werden zusätzlich die Unterschiede der metakognitiven Sensitivität zwischen den Aufmerksamkeitsbedingungen für die drei Verzögerungsstufen dargestellt, in Abbildung 21 die metakognitive Sensitivität in Anhängigkeit der Verzögerungsstufe für jede Altersgruppe getrennt. Wie schon für den Diskriminationserfolg und die perzeptuelle Entscheidungssicherheit beobachtet, wird auch hier deutlich, dass es kaum Unterschiede gibt. Auch die metakognitive Sensitivität erwies sich als invariant gegenüber der Verzögerungszeit. Statistisch ergab sich entsprechend kein signifikanter Zusammenhang zwischen der Verzögerungsstufe und der metakognitiven Sensitivität ($p = 0,124$; $F(2, 86) = 2,141$). Auch

ergaben sich keine signifikanten Interaktionen zwischen metakognitiver Sensitivität, Aufmerksamkeitsbedingung und Verzögerungsstufe ($p = 0,605$; $F(2, 86) = 0,505$) bzw. metakognitiver Sensitivität, Altersgruppe und Verzögerungsstufe ($p = 0,347$; $F(8, 86) = 1,137$).

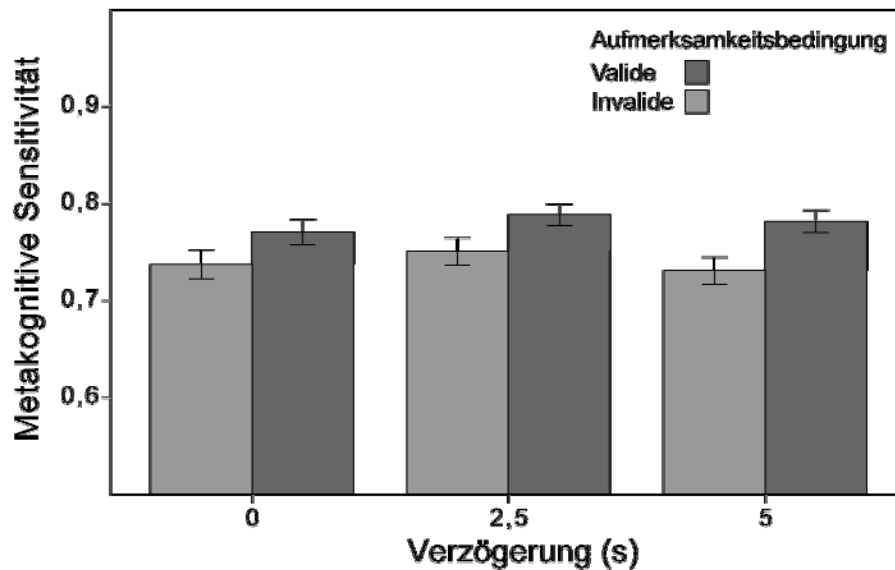


Abbildung 20: Darstellung der metakognitiven Sensitivität +/- ein Standardfehler des Mittelwertes in Abhängigkeit von der Aufmerksamkeitsbedingung und der Verzögerungsstufe (0; 2,5 oder 5 s). Ein statistisch signifikanter Zusammenhang zeigte sich weder zwischen der Verzögerungsstufe und der metakognitiven Sensitivität ($p = 0,124$; $F(2, 86) = 2,141$) noch hinsichtlich der Interaktion zwischen Aufmerksamkeitsbedingung und Verzögerungsstufe ($p = 0,605$; $F(2, 86) = 0,505$).

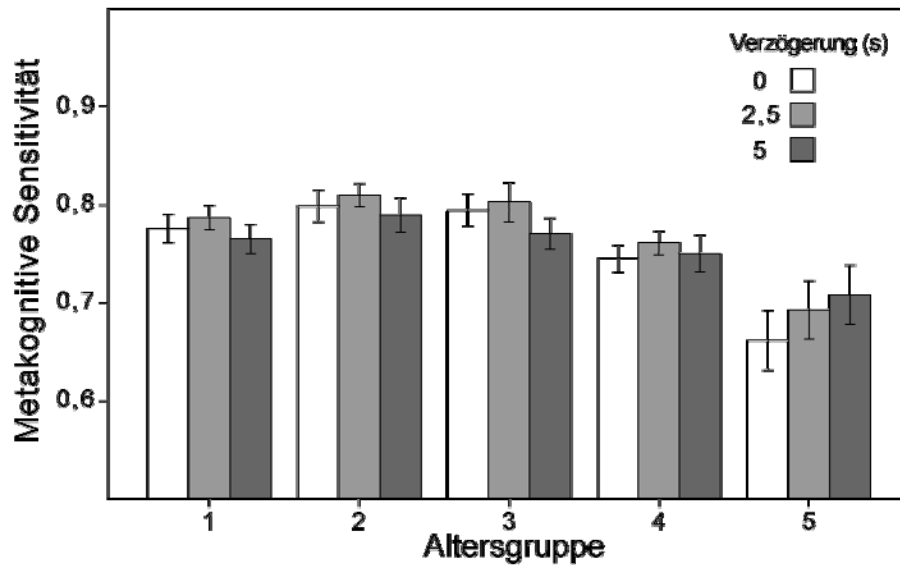


Abbildung 21: Darstellung der metakognitiven Sensitivität +/- ein Standardfehler des Mittelwertes in Abhängigkeit der Verzögerungsstufe (0; 2,5 oder 5 s) und der Altersgruppe (Altersgruppe 1: Probanden zwischen 20 und 29 Jahren, Altersgruppe 2: Probanden zwischen 30 und 39 Jahren, Altersgruppe 3: Probanden zwischen 40 und 49 Jahren, Altersgruppe 4: Probanden zwischen 50 und 59 Jahren, Altersgruppe 5: Probanden zwischen 60 und 69 Jahren). Statistisch ergab sich keine signifikante Interaktion zwischen der Altersgruppe und der Verzögerungszeit ($p = 0,347$; $F(8, 86) = 1,137$).

Zusammenfassend war also kongruent zu den obigen Ergebnissen der Einfluss des Alters sowie der Aufmerksamkeitsbedingung statistisch signifikant ($p = 0,001$; $F(4, 43) = 5,674$ bzw. $p < 0,001$; $F(1, 43) = 16,568$). Die Verzögerungsdauer nahm keinen signifikanten Einfluss auf die metakognitive Sensitivität ($p = 0,124$; $F(2, 86) = 2,141$). Signifikante Interaktionen zwischen den unterschiedlichen experimentellen Bedingungen ergaben sich nicht.

Im Gegensatz zum Diskriminationserfolg und zur Entscheidungssicherheit unterschied sich außerdem der relative Aufmerksamkeitseffekt zwischen den Altersgruppen hinsichtlich der metakognitiven Sensitivität statistisch signifikant ($p = 0,030$; $F(4, 43) = 2,963$).

3.1.4 Augenpositionsdaten

Die Probanden waren angehalten, während des gesamten Experiments einen zentralen Punkt zu fixieren. Es erfolgte eine kontinuierliche Aufzeichnung der Pupillenposition. Die aufgezeichneten Augenbewegungsdaten wurden anschließend für das Intervall der Präsentation des Teststimulus zunächst hinsichtlich Abweichungen in x- und y-Richtung analysiert. Insgesamt war die Augenposition der Probanden in horizontaler und vertikaler Richtung relativ konstant, es gab lediglich geringe Abweichungen nahe 0°: Die horizontale Augenposition betrug im Mittel (alle Probanden, alle Bedingungen) 0,49° mit einer Standardabweichung von 0,40°, die vertikale Augenposition betrug ebenfalls 0,49° mit einer Standardabweichung von 0,52°. In einem weiteren Schritt wurde eine gemischte ANOVA mit denselben Variablen (Diskriminationsleistung, Entscheidungssicherheit, metakognitive Sensitivität) wie für die Wahrnehmungsparameter gerechnet. Diese zeigte keine signifikanten Unterschiede der mittleren x-Position (Verzögerungsintervall: $p = 0,786$; $F(2, 86) = 0,242$, Altersgruppe: $p = 0,997$; $F(4, 43) = 0,040$, Aufmerksamkeitsbedingung: $p = 0,665$; $F(1, 43) = 0,190$) und y-Position (Verzögerungsintervall: $p = 0,681$; $F(2, 86) = 0,386$, Altersgruppe: $p = 0,842$; $F(4, 43) = 0,350$, Aufmerksamkeitsbedingung: $p = 0,969$; $F(1, 43) = 0,002$). Diese Ergebnisse legen somit nahe, dass die Veränderungen der Verhaltensparameter durch die unterschiedlichen experimentellen Manipulationen nicht durch Veränderungen des Fixationsverhaltens bedingt sind.

3.2 Experiment zur merkmalsbasierten Aufmerksamkeit

Im zweiten Teil der vorliegenden Psychophysikstudie wurden die Veränderungen der visuellen Diskriminationsleistung mit dem Alter unter Einsatz merkmalsbasierter Aufmerksamkeit untersucht. Im vorliegenden Experiment entsprach dies der selektiven Ausrichtung der Aufmerksamkeit auf verschiedenfarbige bewegte Reize. In diesem zweiten Experiment wurde ausschließlich der objektive Diskriminationserfolg, also die Häufigkeit korrekt erkannter globaler Bewegungsrichtung analysiert, nicht jedoch die perzeptuelle Entscheidungssicherheit und metakognitive Sensitivität. Bei der Erhebung der psychophysischen Daten kamen hier zwei unterschiedliche Methoden zum Einsatz, nach denen die präsentierte Kohärenzstufe gewählt wurde. In die statistische Auswertung flossen letztlich nur die Ergebnisse der mittels Konstant-Reiz-Methode gewählten Kohärenzstufen ein, um die Datenbasis zwischen den einzelnen Probanden und Experimenten vergleichbar zu halten.

3.2.1 Objektive Diskriminationsfähigkeit der globalen Bewegungsrichtung

Wiederholt konnte gezeigt werden, dass mittels selektiver merkmalsbasierter Aufmerksamkeit die Diskriminationsleistung unterschiedlich kohärenter Bewegungsreize signifikant verbessert werden kann [36] bzw. generell merkmalsbasierte Aufmerksamkeit die Wahrnehmungsleistung in verschiedenen psychophysischen Wahrnehmungsexperimenten verbessert [54-56]. Im zweiten Experiment der vorliegenden Studie wurde untersucht, ob merkmalsbasierte Aufmerksamkeit auch im Alter genutzt wird oder sich verschlechtert.

Abbildung 22 zeigt zunächst den Zusammenhang zwischen Diskriminationsleistung und Altersgruppe für beide Aufmerksamkeitsbedingungen gepoolt. Es kommt eine Abnahme der Diskriminationsleistung mit dem Alter zur Darstellung. Diese ist nicht streng monoton: So ergibt sich die beste Diskriminationsleistung nicht für Altersgruppe 1, sondern für Altersgruppe 2. Die Fähigkeit, inmitten von Störsignalen eine globale Richtung diskriminieren zu können, nimmt mit zu-

nehmendem Alter ab. Eine univariate ANOVA mit der abhängigen Variable Diskriminationserfolg und der unabhängigen Variable Altersgruppe zeigte statistisch signifikante Unterschiede zwischen den Gruppen ($p < 0,001$; $F(4, 45) = 7,384$).

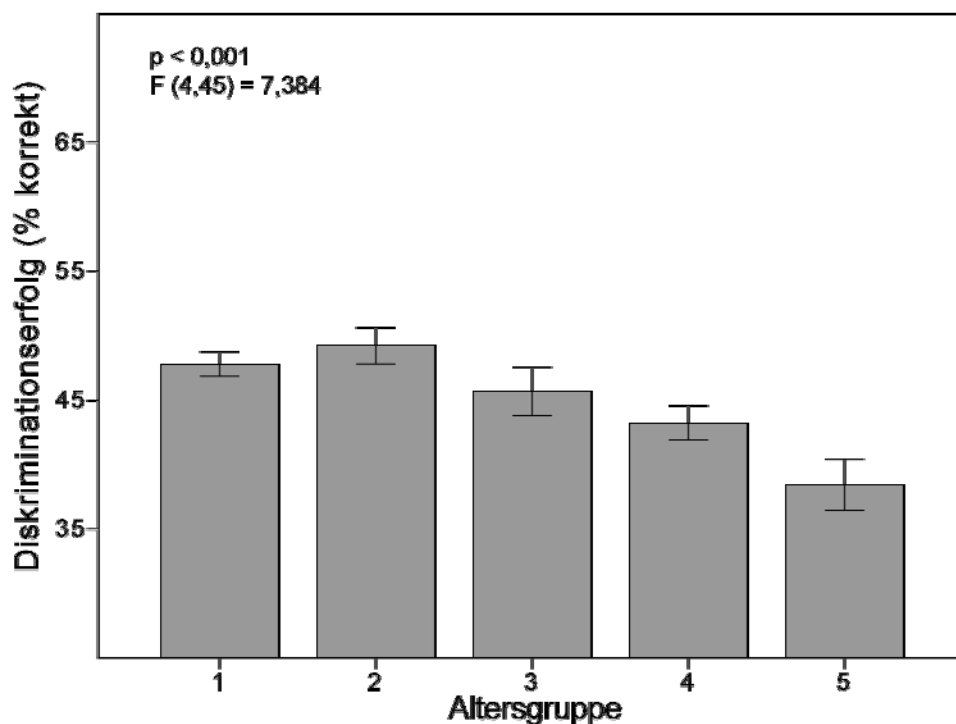


Abbildung 22: Darstellung des Diskriminationserfolgs (prozentualer Anteil korrekt erkannter Reize dividiert durch die Gesamtanzahl aller Einzeldurchgänge +/- ein Standardfehler des Mittelwertes) für jede Altersgruppe (Altersgruppe 1: Probanden zwischen 20 und 29 Jahren, Altersgruppe 2: Probanden zwischen 30 und 39 Jahren, Altersgruppe 3: Probanden zwischen 40 und 49 Jahren, Altersgruppe 4: Probanden zwischen 50 und 59 Jahren, Altersgruppe 5: Probanden zwischen 60 und 69 Jahren). Es wird ersichtlich, dass die Wahrnehmungsleistung im Alter abnimmt. Statistisch unterschieden sich die Gruppen signifikant voneinander ($p < 0,001$; $F(4, 45) = 7,384$).

Abbildung 23 zeigt den Diskriminationserfolg für die Altersgruppen getrennt für die beiden Aufmerksamkeitsbedingungen. Es wird deutlich, dass erwartungsgemäß bei valider Aufmerksamkeitsbedingung die Diskriminationsleistung in allen Gruppen besser war als bei invalider Aufmerksamkeitsbedingung. Für die

valide Aufmerksamkeitsbedingung wird außerdem ersichtlich, dass eine Abnahme der Diskriminationsfähigkeit mit dem Alter besteht, welche nicht streng monoton verlief: Es zeigte sich die beste Wahrnehmungsleistung für die zweite Altersgruppe, nicht für die jüngste Altersgruppe 1. Innerhalb der invaliden Aufmerksamkeitsbedingung wird deutlich, dass für die Altersgruppen 1-4 die objektive Leistung bei inkorrekt gerichteter, invalider Aufmerksamkeit verhältnismäßig ähnlich war. Altersgruppe 5 hingegen zeigte eine deutlich schlechtere Diskriminationsfähigkeit bei invalider Aufmerksamkeit als die anderen Gruppen.

Um den Zusammenhang zwischen der Gruppenzugehörigkeit und dem Einfluss merkmalsbasierter Aufmerksamkeit statistisch zu erfassen, wurde eine gemischte ANOVA mit Messwiederholung mit der abhängigen Variable Diskriminationserfolg und den unabhängigen Variablen Aufmerksamkeit als Innersubjektfaktor und Altersgruppe als Zwischensubjektfaktor berechnet. Die Effekte selektiver merkmalsbasierter Aufmerksamkeit ($p < 0,001$; $F(1, 45) = 33,937$) und der Altersgruppe ($p = 0,002$, $F(4, 45) = 5,092$) waren statistisch signifikant. Eine signifikante Interaktion ergab sich hier nicht ($p = 0,453$; $F(4, 45) = 0,933$).

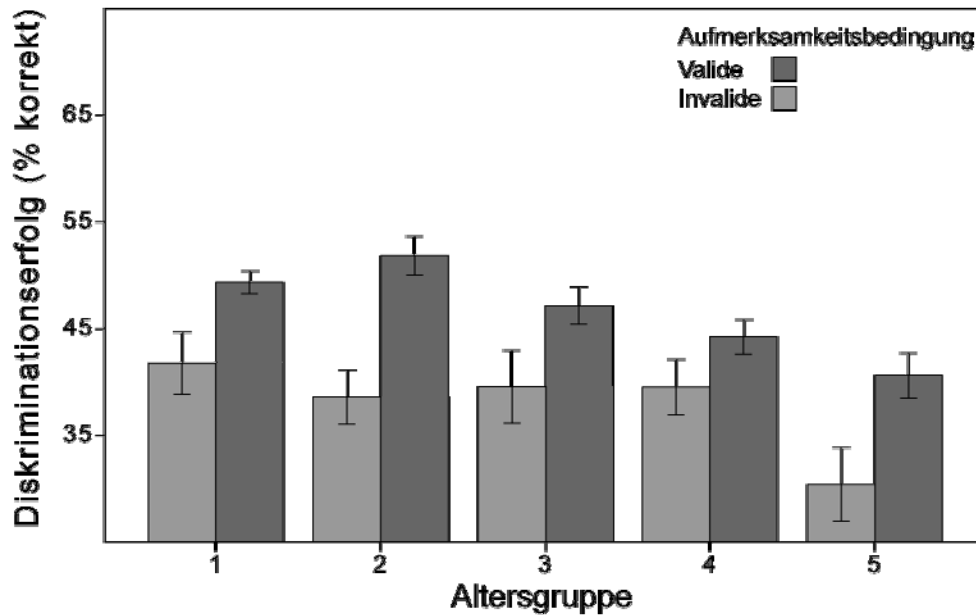


Abbildung 23: Darstellung des Diskriminationserfolgs (prozentualer Anteil korrekt erkannter Reize dividiert durch die Gesamtanzahl aller Einzeldurchgänge +/- ein Standardfehler des Mittelwertes) für beide Aufmerksamkeitsbedingungen und getrennt für jede Altersgruppe (Altersgruppe 1: Probanden zwischen 20 und 29 Jahren, Altersgruppe 2: Probanden zwischen 30 und 39 Jahren, Altersgruppe 3: Probanden zwischen 40 und 49 Jahren, Altersgruppe 4: Probanden zwischen 50 und 59 Jahren, Altersgruppe 5: Probanden zwischen 60 und 69 Jahren). Es ist ersichtlich, dass bei valide ausgerichteter Aufmerksamkeit der Diskriminationserfolg erwartungsgemäß höher als bei invalide ausgerichteter Aufmerksamkeit ist. Die Effekte selektiver merkmalsbasierter Aufmerksamkeit ($p < 0,001$; $F(1, 45) = 33,937$) und der Altersgruppe ($p = 0,002$, $F(4, 45) = 5,092$) waren statistisch signifikant. Eine signifikante Interaktion zwischen der Altersgruppe und der Aufmerksamkeitsbedingung ergab sich nicht ($p = 0,453$; $F(4, 45) = 0,933$).

Um den Effekt selektiv ausgerichteter Aufmerksamkeit weiter zu charakterisieren, wurde auch im vorliegenden Experiment ein Relativmaß der Aufmerksamkeit, der oben definierte Aufmerksamkeitsquotient, errechnet. Um in einem weiteren Schritt die Aufmerksamkeitseffekte zwischen den beiden Experimenten auf Einzelprobandenebene korrelieren zu können, wurden an dieser Stelle die beiden Probanden, die im ersten Experiment ausgeschlossen werden mussten, ebenso aus der Analyse herausgenommen.

Eine Abhängigkeit dieses Aufmerksamkeitseffektes von der Altersgruppe konnte im vorliegenden Experiment nicht gezeigt werden (Abbildung 24). Eine univariate ANOVA mit der abhängigen Variable parametrisierter Aufmerksamkeitseffekt

und der unabhängigen Variable Altersgruppe zeigte statistisch keinen signifikanten Unterschied zwischen den Altersgruppen in Bezug auf den Aufmerksamkeitseffekt ($p = 0,254$; $F(4, 43) = 1,388$).

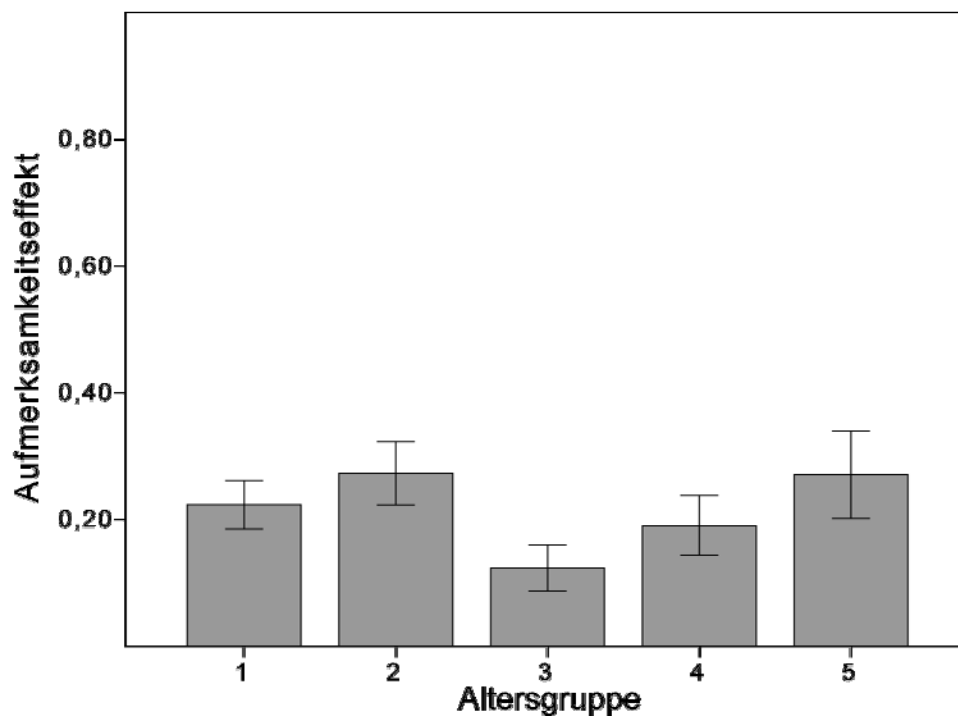


Abbildung 24: Darstellung des parametrisierten Aufmerksamkeitseffekts +/- ein Standardfehler des Mittelwertes getrennt für die fünf Altersgruppen (Altersgruppe 1: Probanden zwischen 20 und 29 Jahren, Altersgruppe 2: Probanden zwischen 30 und 39 Jahren, Altersgruppe 3: Probanden zwischen 40 und 49 Jahren, Altersgruppe 4: Probanden zwischen 50 und 59 Jahren, Altersgruppe 5: Probanden zwischen 60 und 69 Jahren). Signifikante Unterschiede des Aufmerksamkeitseffekts zwischen den Altersgruppen konnten nicht gezeigt werden ($p = 0,254$; $F(4, 43) = 1,388$).

3.2.2 Augenpositionsdaten

Wie im ersten Experiment war es Teil der Instruktion, während des gesamten experimentellen Ablaufs einen zentralen Punkt zu fixieren. Die kontinuierlich aufgezeichneten Augenpositionsdaten wurden für das Intervall der Präsentation des Teststimulus auf Abweichungen der Augenposition hin analysiert. Auch in diesem Experiment zeigte sich eine stabile Fixation mit nur geringen Abwei-

chungen: Diese betragen für die mittlere Augenposition (alle Probanden, alle Bedingungen) - 0,02° in horizontaler Richtung mit einer Standardabweichung von 0,4° und 0,14° in vertikaler Richtung mit einer Standardabweichung von 0,31°. Dann wurde eine gemischte ANOVA mit dem Innersubjektfaktor Aufmerksamkeit und dem Zwischensubjektfaktor Altersgruppe errechnet. Diese zeigte keine signifikanten Unterschiede der mittleren x-Position (Altersgruppe: $p = 0,395$; $F(4, 45) = 1,044$, Aufmerksamkeitsbedingung: $p = 0,749$; $F(1, 45) = 0,104$) und y-Position (Altersgruppe: $p = 0,638$; $F(4, 45) = 0,638$, Aufmerksamkeitsbedingung: $p = 0,106$; $F(1, 45) = 2,725$) während der Stimuluspräsentation zwischen den untersuchten experimentellen Bedingungen. Ein systematischer Einfluss des Fixationsverhaltens, z. B. durch gezielte strategische Augenbewegungen, auf die gemessenen Verhaltensparameter konnte somit nicht gefunden werden.

3.3 Vergleich des Aufmerksamkeitseffekts räumlicher und merkmalsbasierter Aufmerksamkeit

Bisher wurde gezeigt, dass es altersabhängige Veränderungen der Wahrnehmungsleistung sowohl bei räumlicher als auch merkmalsbasierter Aufmerksamkeit gibt. In einem abschließenden Schritt wurden die Effekte räumlicher Aufmerksamkeit mit denen merkmalsbasierter Aufmerksamkeit miteinander korreliert. Hierfür wurde eine partielle Korrelation zwischen dem parametrisierten Aufmerksamkeitseffekt bei räumlicher Aufmerksamkeit und dem bei merkmalsbasierter Aufmerksamkeit berechnet, welche für die Kovarianz des Alters kontrolliert (Abbildung 25). Auf den ersten Blick scheinen die Probanden, welche im Test zur räumlichen Aufmerksamkeit starke Verbesserungen aufwiesen, auch diejenigen zu sein, die im Test zur merkmalsbasierten Aufmerksamkeit starke Effekte aufwiesen. Mit anderen Worten, es ergibt sich zunächst eine signifikante Korrelation zwischen den beiden Aufmerksamkeitsleistungen ($p = 0,030$, $R = 0,316$).

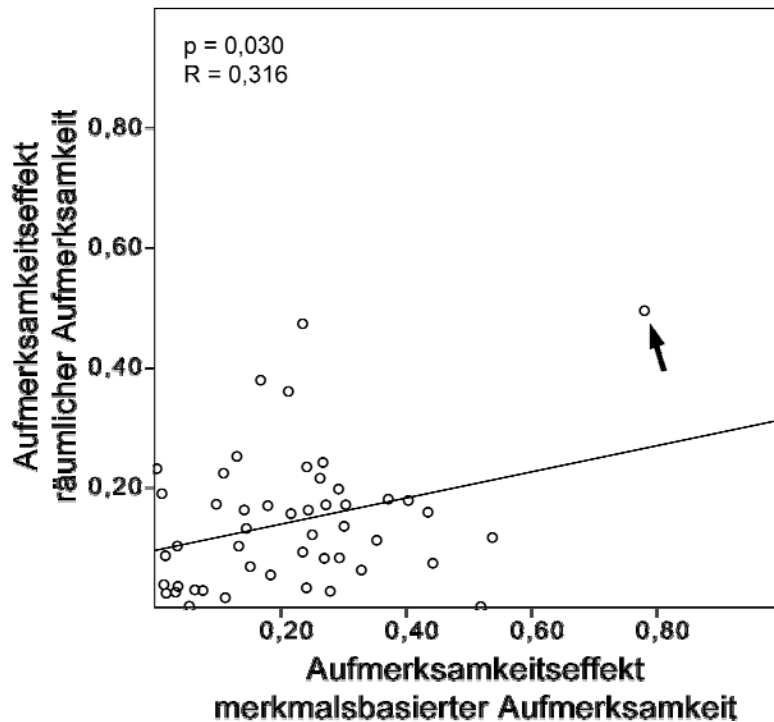


Abbildung 25: Darstellung des Zusammenhangs zwischen räumlicher und merkmalsbasierter Aufmerksamkeit. Für jeden einzelnen Probanden ($n = 48$) sind die Ergebnisse zum Test der räumlichen Aufmerksamkeitsausrichtung (y-Achse) und Test zur merkmalsbasierten Aufmerksamkeit (x-Achse) dargestellt. Eine partielle Korrelation, die für die Kovariable Alter kontrolliert, legt zunächst eine signifikante Korrelation zwischen den beiden Leistungen nahe ($p = 0,030$, $R = 0,316$). Allerdings ist die Korrelation wesentlich durch einen singulären Probanden bedingt (durch Pfeil markiert).

Auffällig bei dieser Grafik sind jedoch die insgesamt breite Streuung der Werte und der mit dem Pfeil markierte Ausreißer. Nach Ausschluss des Ausreißers ergibt sich keine statistisch signifikante Korrelation mehr ($p = 0,456$; $R = 0,113$, Abbildung 26).

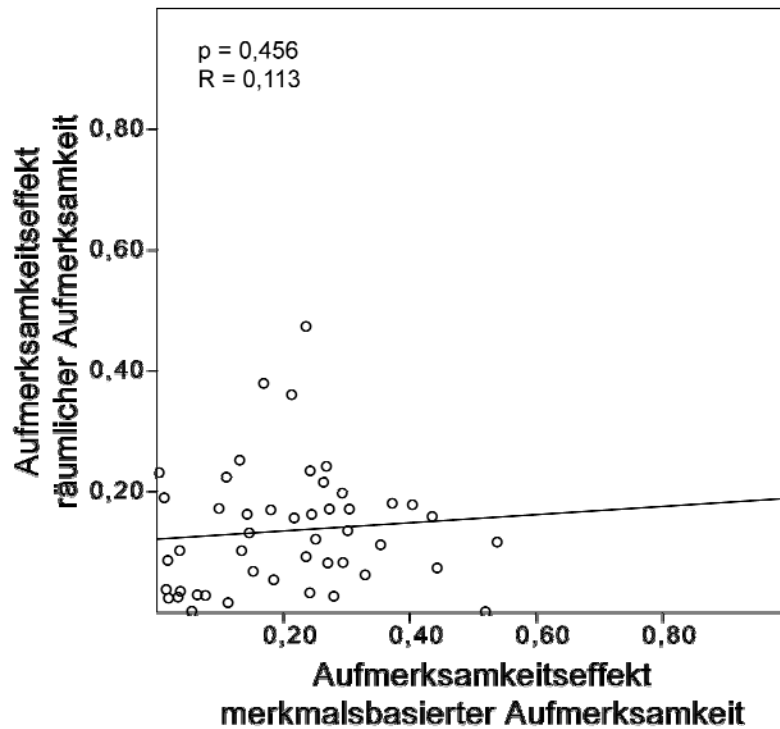


Abbildung 26: : Darstellung des Zusammenhangs zwischen räumlicher und merkmalsbasierter Aufmerksamkeit nach Ausschluss des Ausreißers. Für jeden einzelnen Probanden ($n = 47$) sind die Ergebnisse zum Test der räumlichen Aufmerksamkeitsausrichtung (y-Achse) und Test zur merkmalsbasierten Aufmerksamkeit (x-Achse) dargestellt. Eine partielle Korrelation, die für die Kovariable Alter kontrolliert, zeigt nach Ausschluss des Ausreißers keinen statistisch signifikanten Zusammenhang mehr ($p = 0,456$, $R = 0,113$).

4. Diskussion

Zielsetzung der vorliegenden Studie war es zu untersuchen, welchen Einfluss zunehmendes Lebensalter auf zwei unterschiedliche, grundlegende Teilaspekte visueller Wahrnehmung hat, welche Rolle selektive Aufmerksamkeit als möglichen Kompensationsmechanismus in unterschiedlichem Alter spielt und wie sich die metakognitive Sensitivität vom frühen Erwachsenenalter bis zum Senium hin verändert. Hierfür wurde in zwei psychophysischen Experimenten eine repräsentative Stichprobe von 50 Probanden zwischen 20 und 70 Jahren untersucht.

Die Ergebnisse der vorliegenden Studie zeigen erstmals anschaulich, dass neben der Diskriminationsfähigkeit auch die perzeptuelle Entscheidungssicherheit hinsichtlich bewegter Stimuli eine signifikante Altersabhängigkeit aufweist: Sie nimmt mit zunehmendem Alter ab. Auch die metakognitive Sensitivität verändert sich signifikant mit dem Alter. Im Folgenden werden diese Ergebnisse mit aktueller Literatur und Forschung in Kontext gesetzt und diskutiert. Hierzu werden einige aktuelle, exemplarisch ausgewählte, repräsentative Vorgängerstudien herangezogen, wobei sich die getroffene Auswahl insbesondere an für die vorliegende Studie relevanten Inhalten orientiert.

4.1 Diskussion der Verhaltensdaten im Experiment zur räumlichen Aufmerksamkeit

Im ersten Teil der vorliegenden Psychophysikstudie waren die Probanden aufgefordert, die globale Bewegungsrichtung eines Punktkinematogramms zu diskriminieren und durch einen virtuellen Wetteinsatz eine Angabe darüber zu machen, wie sicher sie sich waren, dass sie die Wahrnehmungsaufgabe im gegebenen Durchgang korrekt gelöst hatten. Die Probanden waren außerdem angehalten, bei konstanter Fixation eines zentralen Punktes ihre Aufmerksamkeit entsprechend eines Instruktionspfeils selektiv auf das rechte oder linke Halbfeld zu richten. Weiterhin wurde das Zeitintervall zwischen Stimuluspräsentation und

Abfrage der motorischen Antwort variiert, sodass das Experiment drei unterschiedliche zeitliche Abläufe umfasste.

4.1.1 Diskriminationsleistung

Mit zunehmender Kohärenz fällt es leichter, die globale Bewegungsrichtung zu erkennen. Entsprechend zeigte sich in der vorliegenden Studie eine Zunahme der objektiven Wahrnehmungsleistung, also der Diskriminationsleistung der Probanden, mit steigender Kohärenz. Diese Verbesserung zeigte sich sowohl für die valide als auch die invalide Aufmerksamkeitsbedingung, wobei die Wahrnehmungsleistung bei valide ausgerichteter Aufmerksamkeit stets besser war als bei invalider Aufmerksamkeit. Die Verbesserung der objektiven Wahrnehmungsleistung mit der Kohärenz und korrekt ausgerichteter selektiver räumlicher Aufmerksamkeit war in allen Altersgruppen erkennbar. Diese Feststellungen decken sich mit den Ergebnissen vorhergehender Studien, die wiederholt eine Verbesserung der Wahrnehmungsleistung mit günstigerem Signal-Rausch-Verhältnis und valider Aufmerksamkeit zeigen konnten [36, 44, 49, 50].

Ein besonderes Interesse galt dem Einfluss des zunehmenden Alters. Im vorliegenden Experiment konnte, im Einklang mit aktueller Literatur [1, 14, 57-60], eine signifikante Abnahme der objektiven Wahrnehmungsleistung mit zunehmendem Alter belegt werden. Verschiedene Vorgängerstudien untersuchten ähnliche Zusammenhänge mit zum Teil unterschiedlichen Ergebnissen. Die Vergleichbarkeit ist insgesamt eingeschränkt, da sich die visuellen Paradigmen stark unterscheiden. Eine aktuelle Studie von Mateus et al. von 2013 untersuchte den Einfluss zunehmenden Alters auf hierarchisch gegliederte, höhere und basale visuelle Wahrnehmungsaspekte in einer großen Kohorte von über 600 Probanden. Ähnlich wie im vorliegenden Experiment waren die Probanden in fünf Altersgruppen zwischen 20 Jahren und über 60 Jahren eingeteilt [59]. Mit Ausnahme der Rot-Grün-Diskrimination bestand für alle untersuchten visuellen Funktionen eine Altersabhängigkeit. Es zeigte sich außerdem ein stärkerer Einfluss des Alters auf höhere kognitiv-visuelle Funktionen, wie z. B. dreidimensionale Objektwahrnehmung, als auf basale Funktionen, wie beispielsweise die

Kontrastsensitivität für farblose, statische Stimuli. Bei der Diskrimination von Geschwindigkeiten fanden sich außerdem Unterschiede in Abhängigkeit der Stimuluspräsentationsdauer: Eine signifikante Altersabhängigkeit zeigte sich nur bei einer Präsentationsdauer von unter 400 ms, nicht jedoch bei einer Präsentationsdauer von 600 ms. Die von Mateus et al. (2013) beschriebenen Altersabhängigkeiten stehen somit insgesamt gut im Einklang zu den hier beschriebenen Alterseffekten, insofern diese schon im Alter bis 70 Jahre signifikant sind. Im Gegensatz dazu beschrieben Bennett et al. (2007), dass sich signifikante Änderungen erst ab dem 70. Lebensjahr einstellen: Probanden im Alter zwischen 70 und 81 Jahren unterschieden sich signifikant in ihrer Wahrnehmungsleistung von den jüngeren Probanden, wohingegen zwischen den anderen Altersgruppen (Probandenalter zwischen 20 und 69 Jahren) kein signifikanter Unterschied gefunden werden konnte [1]. Mögliche Gründe für die abweichenden Ergebnisse zwischen den Studien könnten Unterschiede in der visuellen Stimulation oder auch die Art und Weise sein, mit welcher die Antworten mitgeteilt wurden (hier: Tastendruck, Bennett et al.: Mauscursor). Wie in den vorliegenden Experimenten verwendeten Bennett et al. ebenso Punktkinematogramme. Diese wurden jedoch zentral und nicht innerhalb eines Halbfeldes präsentiert. Dies könnte möglicherweise die Wahrnehmungsaufgabe vereinfacht haben, sodass die Defizite erst in höherem Alter messbar waren. Auch eine Manipulation der Aufmerksamkeitsbedingungen erfolgte bei Bennett et al. nicht. Weiterhin ist zu überlegen, ob Unterschiede der zeitlichen Abläufe ursächlich sein können. So konnten auch Bennett et al. eine Verbesserung der Wahrnehmungsleistung mit zunehmender Dauer der Stimuluspräsentation mit dem Alter zeigen. Diese Variable wurde im vorliegenden Experiment nicht modifiziert, sondern die Präsentation des Diskriminationsreizes erfolgte konstant mit einer vergleichsweise kurzen Dauer von 250 ms. Im Experiment von Bennett et al. wurde u. a. auch eine Stimulusdauer von 255 ms gewählt. Hier zeigten sich jedoch keine signifikanten Unterschiede zwischen den Altersgruppen von 20-69 Jahren.

In der vorliegenden Studie ergab sich außerdem eine signifikante Interaktion zwischen der Kohärenzstufe und der Altersgruppe. Hieraus lässt sich schlussfolgern, dass der Einfluss der Kohärenzstufe in den einzelnen Gruppen unter-

schiedlich stark ausgeprägt ist. Betrachtet man in Abbildung 5 die Kohärenzstufen im Einzelnen, zeigt sich eine Abnahme des Diskriminationserfolgs mit dem Alter bei gleichen Kohärenzstufen. Dies bedeutet, dass mit steigendem Alter bei gleicher Kohärenz weniger häufig die korrekte globale Bewegungsrichtung erkannt wird. In dieser Abbildung wird nicht nur deutlich, dass der Diskriminationserfolg, also die Sensitivität für visuelle Wahrnehmungsreize, mit dem Alter abnimmt. Es zeigt sich auch, dass diese Abnahme insbesondere für höhere und mittlere Kohärenzstufen (20 % bis 100 % Kohärenz), weniger für niedrigere Kohärenzstufen (insb. 5 %) ausgeprägt ist. Es kann daher festgehalten werden, dass die Altersabhängigkeit besonders für solche Kohärenzen eine Rolle spielt, bei denen ein korrektes Erkennen prinzipiell (gut) möglich ist.

Der Aufmerksamkeitseffekt, d. h. die Verbesserung der Wahrnehmungsleistung durch gezielte Aufmerksamkeitsausrichtung, zeigte sich, wie oben erläutert, in allen Gruppen. Selektive Aufmerksamkeit führt folglich bis ins hohe Alter zu einer Verbesserung objektiver Wahrnehmungsfähigkeiten. Die numerisch größte Differenz zwischen der Diskriminationsfähigkeit bei valider und invalider Aufmerksamkeit findet sich sogar in der ältesten Altersgruppe 5 (vgl. Abbildung 6 und Abbildung 7). Eine signifikante Abhängigkeit der Aufmerksamkeitsleistungen zeigte sich nicht. Es kann daher postuliert werden, dass nachlassende Wahrnehmungsleistungen im Alter durch gezielte Verschiebung visueller Aufmerksamkeit zumindest zum Teil kompensiert werden können. Umgekehrt bedeutet dieser Zusammenhang, dass ältere Menschen noch kritischer von gezielt ausgerichteter Aufmerksamkeit abhängen als junge Menschen. Die schlechteste Diskriminationsleistung fand sich in Altersgruppe 5 bei invalider Aufmerksamkeit (vgl. Abbildung 6). Ältere Probanden können offensichtlich invalide ausgerichtete Aufmerksamkeit weniger gut kompensieren als junge, trotzdem geht diese Kompensationsfähigkeit nicht zur Gänze verloren: Der Diskriminationserfolg lag auch hier trotzdem noch deutlich über der Ratewahrscheinlichkeit von 25 % (vgl. hierzu auch [61]).

Neben Kohärenz und Aufmerksamkeitsbedingung wurde in diesem ersten Teil des Experiments auch die zeitliche Verzögerungsdauer zwischen Präsentation

des Teststimulus und Zeitpunkt der Instruktion zur Angabe der motorischen Antwort variiert. Eine EEG-Studie von 2014, die einen sehr ähnlichen visuellen Stimulus wie die vorliegende Studie einsetzte, hatte gezeigt, dass bei invalider Aufmerksamkeitsausrichtung nach Präsentation des zweiten Pfeils ein ähnliches kortikales Aktivierungsmuster messbar ist, wie zum Präsentationszeitpunkt des eigentlichen Teststimulus. Dieses Muster wurde als endogene Reaktivierung der ursprünglich unterdrückten sensorischen Information gewertet [44]. Aus dieser Beobachtung leitete sich die Frage ab, ob mit zunehmender Verzögerungsdauer die Diskriminationsleistung, vor allem bei invalider Aufmerksamkeit, abnimmt, da mit der Zeit die Reproduktion des Reizes immer schwieriger werden dürfte. Dies könnte insbesondere bei älteren Probanden einen Nachteil darstellen. Statistisch zeigte sich in den gewählten Zeitfenstern zwischen 0 und 5 s jedoch keine signifikante Abnahme der Wahrnehmungsleistung mit zunehmender Verzögerung (vgl. Abbildung 8 und Abbildung 9). Zu einem ähnlichen Ergebnis, wenn auch unter Verwendung eines anderen visuellen Stimulus, kamen Bennett et al. (s. o.). Sie konnten zeigen, dass ältere Probanden bei Verzögerungsintervallen zwischen 0,24 und 6 s (Ende des Teststimulus bis Abfragezeitpunkt der Richtungsangabe) keine signifikanten Änderungen ihrer objektiven Wahrnehmungsleistung aufweisen [1]. Somit scheint die Diskriminationsleistung im Rahmen einer perzeptuellen Wahrnehmungsaufgabe nach dem Alles-oder-Nichts-Prinzip unmittelbar nach Aufnahme des Diskriminationsreizes zu erfolgen und dann auch mit zunehmender Verzögerung nicht mehr modifiziert zu werden. Diese konstante, vom Verzögerungsintervall unabhängige Diskriminationsleistung legt nahe, dass die perzeptuelle Entscheidung innerhalb des untersuchten Zeitraums nicht aus dem Gedächtnis verblasst und auch im Verlauf noch adäquat abgerufen werden kann. Die begrenzte Kapazität des visuellen Arbeitsgedächtnisses und die Verbesserung, die hinsichtlich der visuellen Arbeitsgedächtnisleistung durch selektive Aufmerksamkeit erzielt werden kann, sind dennoch unstrittig und in zahlreichen Studien belegt [62-64]. Es erscheint deshalb plausibel, dass ab einer kritischen Verzögerungszeit, welche die hier eingesetzte Zeit überschreitet, auch Einflüsse auf die visuelle Diskriminationsleistung auftreten dürften.

Eine konkurrierende Hypothese war, dass eine zunehmende Verzögerung bis zur Abfrage der motorischen Antwort auch einen Vorteil bei zunehmendem Alter darstellen könnte. In der Literatur finden sich zahlreiche Beispiele altersabhängiger Veränderungen in Bezug auf Geschwindigkeit und Präzision von Bewegungsabläufen [65]. Weiterhin gibt es Arbeiten, die postulieren, dass altersabhängige Veränderungen von Wahrnehmungsleistungen auf eine allgemeine Verlangsamung der Informationsverarbeitung zurückzuführen sind [66, 67]. So lag die Frage nahe, ob einerseits ältere Probanden bei längerer Verzögerung zu einer präziseren Antwort gelangen können, da mehr Zeit verbleibt, die korrekte motorische Antwort zu initiieren. Andererseits wurde postuliert, dass eine Abnahme der Wahrnehmungsleistung mit dem Alter auf eine Verschlechterung motorischer Fähigkeiten in der Nutzung des Antwort-Devices begründet sein könnte. Für die erste Überlegung liefert die vorliegende Studie keine Evidenz. Auf die zweite Überlegung kann anhand der im Rahmen dieser Studie durchgeführten Experimente keine Antwort gegeben werden, da der manuelle Umgang der Probanden mit der Antwort-Vorrichtung nicht geprüft wurde. Andere Studien untersuchten ähnliche Zusammenhänge unter Ergänzung motorischer Kontrollexperimente, konnten jedoch keine signifikanten Belege dafür finden, dass mit dem Alter schwindende Wahrnehmungsfähigkeiten auf Defizite in der Nutzung technischer Vorrichtungen erklärt werden können [1]. Auch vor dem Hintergrund der vergleichsweise einfachen motorischen Antwort, die in der vorliegenden Studie gefordert wurde, erscheint es damit plausibel, die hier beobachteten Defizite als echte Einschränkungen der Wahrnehmung und nicht als motorische Artefakte aufzufassen.

4.1.2 Perzeptuelle Entscheidungssicherheit

Durch ein Wettparadigma wurde das Zutrauen der Probanden in ihre getroffene Wahrnehmungsentscheidung untersucht. Diese subjektive Konfidenzbewertung wird auch als perzeptuelle Entscheidungssicherheit bezeichnet. Diese verhielt sich im vorliegenden Experiment sehr ähnlich wie die objektive Diskriminationsleistung: Objektive Wahrnehmungsleistung und subjektive Entscheidungssicherheit veränderten sich mit dem Alter parallel. Wie erwartet und aus anderen

Studien bekannt, zeigte sich einerseits eine Abhängigkeit der Entscheidungssicherheit vom präsentierten Kohärenzniveau (vgl. Abbildung 11) [36, 68, 69] und andererseits auch ein signifikanter Zusammenhang zwischen Entscheidungssicherheit und der Aufmerksamkeitsbedingung (vgl. Abbildung 12 und Abbildung 13) [36, 44]. Zunehmende Kohärenz führt nicht nur zu einer Verbesserung der Diskriminationsfähigkeit (s. o.), sondern auch zu einer Steigerung der Entscheidungssicherheit. Dies bedeutet, dass sich die Probanden mit höherer Kohärenz, also bei einfacheren Wahrnehmungsaufgaben, ihrer Wahrnehmungsentscheidung sicherer waren und auch häufiger korrekt antworteten. Ebenso führte valide gerichtete Aufmerksamkeit zu einer Zunahme der perzeptuellen Entscheidungssicherheit, d. h. bei korrekt ausgerichteter Aufmerksamkeit war das Vertrauen der Probanden in ihre Wahrnehmungsentscheidung größer als bei invalider Aufmerksamkeit. Dieses Ergebnis bestätigt Beobachtungen früherer Untersuchungen [36, 44, 69]. Überdies war der Effekt der verschiedenen Kohärenzstufen für die Altersgruppen unterschiedlich ausgeprägt, hier ergab sich eine signifikante Interaktion. Ähnlich wie auch beim objektiven Diskriminationserfolg zeigten sich Unterschiede zwischen den Gruppen kaum bei der schwierigsten Kohärenzstufe von 5 %. Ausgeprägter unterscheiden sich die Gruppen jedoch bei potentiell lösbaren Wahrnehmungsaufgaben, also im höheren Kohärenzbereich.

Der Aufmerksamkeitseffekt in der Domäne Entscheidungssicherheit zeigte sich in allen Altersgruppen, hier besonders ausgeprägt in Altersgruppe 5 (vgl. Abbildung 12 und Abbildung 13). Wie auch bei der objektiven Diskriminationsleistung fand sich der niedrigste Entscheidungssicherheitsindex bei invalider Aufmerksamkeitsbedingung und höchster Altersgruppe. Mit anderen Worten, die verringerte Entscheidungssicherheit spiegelt das primäre Wahrnehmungsdefizit wider.

Untersuchungen zur Frage, wie sich die perzeptuelle Entscheidungssicherheit im Laufe des Alterns verhält, sind rar. In der Literatur finden sich verschiedene Studien, welche eine altersabhängige Abnahme der Genauigkeitseinschätzung im Rahmen von Gedächtnisaufgaben zeigen [70, 71]. Weiterhin gibt es Unter-

suchungen zur altersabhängigen Sicherheitseinschätzung bei der Wahrnehmung von unterschiedlich stark kontrastierten Reizen (sogenannter Gabor Patches) [72, 73]. Studien, welche die perzeptuelle Entscheidungssicherheit in Abhängigkeit vom Alter unter Verwendung eines bewegten visuellen Stimulus und selektiver räumlicher Aufmerksamkeit untersuchen, fanden sich in einer PubMed Recherche im August 2016 nicht. Im Rahmen dieser Arbeit konnte hier somit erstmals gezeigt werden, dass die perzeptuelle Entscheidungssicherheit hinsichtlich bewegter Stimuli eine signifikante Altersabhängigkeit aufweist und mit zunehmendem Alter abnimmt (vgl. Abbildung 10).

Die Verzögerungsstufe betreffend zeigte sich, analog zur Diskriminationsleistung, kein signifikanter Einfluss auf die Entscheidungssicherheit. Das heißt, dass eine perzeptuelle Entscheidung nicht nur unmittelbar getroffen wird, sondern dieser Entscheidung auch gleichzeitig eine Konfidenzbewertung zugeordnet wird, welche dann im untersuchten Zeitraum keine weitere Modifikation mehr erfährt.

Eine statistisch schwach signifikante Interaktion ergab sich zwischen der Verzögerungsstufe und der Altersgruppe in Bezug auf die perzeptuelle Entscheidungssicherheit (vgl. Abbildung 14). Die Bedeutung dieser Interaktion bleibt ohne klar erkennbaren systematischen Zusammenhang unklar.

4.1.3 Metakognitive Sensitivität

Wichtiger als Entscheidungssicherheit per se ist die Frage, wie gut die subjektive Entscheidungssicherheit die objektive Wahrnehmungsleistung tatsächlich wiedergibt. Für diesen Zusammenhang wurde der Begriff der metakognitiven Sensitivität eingeführt. Er beschreibt, wie gut Wahrnehmungsleistung und Entscheidungssicherheit übereinstimmen [42, 53]. Es ist bekannt, dass die metakognitive Sensitivität von der objektiven Wahrnehmungsleistung beeinflusst wird [33, 42, 43]. So zeigen Probanden bei einfacheren Aufgaben eine scheinbar bessere metakognitive Sensitivität als bei schwierigeren Aufgaben. Es besteht also ein direkter Einfluss von Stimuluseigenschaften auf die metakognitive Sensitivität. Auch im vorliegenden Experiment zeigte sich ein solcher Zusam-

menhang zwischen der Kohärenzstufe und der metakognitiven Sensitivität (vgl. Abbildung 17). Die Abbildung macht jedoch deutlich, dass die metakognitive Sensitivität ihr Maximum nicht, wie man erwarten könnte, bei einer Kohärenz von 100 % erreicht. Vielmehr scheint sie in den Altersgruppen 2 bis 5 bei einem Kohärenzlevel von 50 % einen Sättigungswert zu erreichen, um dann bei maximaler Kohärenz wieder abzufallen. Im mittleren Schwierigkeitsbereich bildet die subjektive Entscheidungssicherheit die objektive Leistung daher am besten ab. Hier verhält sich die metakognitive Sensitivität anders als die Diskriminationsfähigkeit und die Entscheidungssicherheit (vgl. Abbildung 5 und Abbildung 11), die beide ihr Maximum bei einer Kohärenz von 100 % erreichen. Die Abnahme der metakognitiven Sensitivität bei höchster Kohärenz wirkt zunächst kontraintuitiv, zumal eine monotone positive Korrelation zwischen objektiver Wahrnehmungsleistung und metakognitiver Sensitivität in verschiedenen Vorgängerarbeiten belegt werden konnte [43, 74]. Ferner zeigte sich jedoch auch in verschiedenen Vorgängerstudien wiederholt, dass die metakognitive Leistung im Rahmen visueller Wahrnehmungsaufgaben dazu neigt, den Idealwert, also die maximale Entsprechung zwischen objektiver und subjektiver Leistung, zu verfehlen, sondern schlechter ausfällt, als die tatsächlich erbrachte Leistung [43, 75, 76]. Dieser Zusammenhang zeigte sich auch in der vorliegenden Studie im hohen Kohärenzbereich: Der Diskriminationserfolg steigt zwischen 50 und 100 % Kohärenz weiter an. Die metakognitive Sensitivität fällt in den meisten Altersgruppen (mit Ausnahme von Altersgruppe 1) an dieser Stelle jedoch ab. Maniscalco et al. bieten in einer Arbeit von 2012 unterschiedliche Erklärungsansätze für diese Beobachtung an [43]. 2016 konnte durch Maniscalco et al. außerdem erstmals durch bewusste Manipulation der Lösungsstrategie im Rahmen einer Wahrnehmungsaufgabe auch eine negative Korrelation zwischen Wahrnehmungsleistung und metakognitiver Sensitivität gezeigt werden [77]. Unter Berücksichtigung der Ergebnisse der zitierten Arbeiten sowie der Ergebnisse der vorliegenden Studie, lässt sich festhalten, dass objektive Wahrnehmungsleistung und metakognitive Sensitivität zwar eng korrelieren, unter bestimmten Voraussetzungen, z. B. bei Verwendung unterschiedlicher Lösungsstrategien oder unterschiedlicher Signalstärke, jedoch auch dissoziieren kön-

nen. In zunehmendem Lebensalter, wenn dem bewussten Einsatz metakognitiver Ressourcen möglicherweise eine wachsende Bedeutung zukommt, könnte die Dissoziation beider Parameter einen besonderen Nachteil darstellen. Zukünftige Studien sollten sich daher damit beschäftigen, wie metakognitive Leistung optimiert werden kann, welche Lösungsstrategien im Rahmen visueller Wahrnehmungsaufgaben besonders günstig erscheinen und wie eine Dissoziation vermieden werden kann.

Die vorliegende Studie zeigt, dass die metakognitive Sensitivität signifikant von der Aufmerksamkeitsbedingung abhängt. Mit valide ausgerichteter Aufmerksamkeit stimmen objektive Leistung und subjektive Entscheidungssicherheit besser überein. Dies erscheint plausibel, da bekanntermaßen die metakognitiven Fähigkeiten von der Wahrnehmungsleistung selbst abhängen [43] und, wie bereits erläutert, mit valider Aufmerksamkeit sowohl objektive als auch subjektive Wahrnehmung besser sind als bei invalider Aufmerksamkeit. Mittels selektiver Aufmerksamkeit lassen sich somit metakognitive Fähigkeiten verbessern. Tendenziell war besonders in Altersgruppe 5 eine besonders deutliche Zunahme der metakognitiven Sensitivität bei valider Aufmerksamkeitsbedingung zu verzeichnen (vgl. Abbildung 18). Diese Tendenz war mit Blick auf den (relativen) Aufmerksamkeitseffekt auch statistisch signifikant (vgl. Abbildung 19). Mit anderen Worten, durch valide Aufmerksamkeitsausrichtung war es den Probanden im höheren Alter besonders möglich, die Richtigkeit ihrer Diskriminationsleistung besser einzuschätzen. Hier zeigt sich erneut, dass sich Diskriminationsfähigkeit und Entscheidungssicherheit parallel zueinander, nicht jedoch streng parallel zur metakognitiven Sensitivität verhalten. Ähnliche Zusammenhänge wurden in einer Studie von 2016 gefunden, die visuelle Diskriminationsfähigkeit und perzeptuelle Entscheidungssicherheit in einem Experiment zu perzeptuellem Lernen untersuchten: Auch hier verhielten sich Diskriminationsfähigkeit und Entscheidungssicherheit gleichartig und verbesserten sich mit Training, nicht jedoch die metakognitive Sensitivität, die keine signifikante Veränderung erfuhr [78].

Die Frage, wie sich metakognitive Fähigkeiten im Laufe des Lebens entwickeln, bietet viel Raum für Diskussion. Einerseits kann man argumentieren, dass sich durch eine Zunahme von Erfahrungswerten, Selbstkenntnis und Wissensschatz metakognitive Fähigkeiten mit zunehmendem Alter verbessern könnten. Andererseits finden sich in der Literatur Belege dafür, dass sich neuronale Korrelate von Metakognition insbesondere in Gehirnarealen finden, die besonders stark von degenerativen Altersprozessen betroffen sind, wie z. B. im präfrontalen und parietalen Kortex [76, 79-81]. Möglicherweise spielen beide Faktoren eine Rolle. Die vorliegende Studie konnte belegen, dass die metakognitive Sensitivität signifikant vom Alter abhängt (vgl. Abbildung 16). Diese Abhängigkeit verhielt sich jedoch (erneut) nicht analog der objektiven Wahrnehmungsleistung oder der perzeptuellen Entscheidungssicherheit, die beide eine monotone Abnahme mit zunehmendem Alter zeigten. Vielmehr scheint die metakognitive Sensitivität mit zunehmendem Alter zunächst eine Verbesserung zu erfahren, erreicht ihren Zenit dann im mittleren Erwachsenenalter (Altersgruppe 2), bevor sie ab Altersgruppe 3 beginnt kontinuierlich abzufallen. Eine besondere Abnahme zeigt sich in der Altersgruppe der über 60-Jährigen (Abbildung 16). Vergleichbare Zusammenhänge fanden sich in zwei Studien von Palmer et al. und Weil et al. [72, 73] die eine ähnliche Fragestellung an unbewegten visuellen Stimuli untersuchten. Palmer et al. untersuchten die Altersabhängigkeit metakognitiver Fähigkeiten an 60 Probanden zwischen 18 und 84 Jahren anhand zweier unterschiedlicher Aufgaben: Im ersten Teil des Experiments bestand die Aufgabe in der visuellen Diskrimination unterschiedlich stark kontrastierter Reize (sogenannter Gabor Patches), beim zweiten Teil handelte es sich um eine Gedächtnisaufgabe, im Rahmen derer Begriffe erinnert und zugeordnet werden mussten. Beide Experimente beinhalteten eine anschließende Konfidenzbewertung. Der Zusammenhang zwischen objektiver Leistung und subjektivem Zutrauen wird in dieser Arbeit als metakognitive Effizienz bezeichnet und errechnet sich, wie die metakognitive Sensitivität in der vorliegenden Arbeit, anhand einer ROC-Kurve [43]. Es konnte eine signifikante negative Korrelation zwischen dem Alter und der perzeptuellen metakognitiven Effizienz gefunden werden, wohingegen die Korrelation der metakognitiven Effizienz im Rahmen der Gedächtnisaufgabe mit

dem Alter nicht signifikant war. Mit anderen Worten, wie in der vorliegenden Studie konnten ältere Probanden bei der Wahrnehmungsaufgabe ihre eigene Leistung weniger zutreffend einschätzen als jüngere Probanden. Weil et al. untersuchten anhand einer Wahrnehmungsaufgabe, die genau wie im Experiment von Palmer et al. in der visuellen Unterscheidung von Gabor Patches bestand, denselben Zusammenhang in einer Gruppe von Probanden zwischen 11 und 41 Jahren. Auch hier zeigte sich ein signifikanter Zusammenhang zwischen Alter und metakognitiver Fähigkeit: Es kam zunächst zu einer Zunahme metakognitiver Fähigkeiten in der Adoleszenz und dann zu einem Plateau im Erwachsenenalter. Palmer et al. zogen die Möglichkeit in Betracht, dass diese Altersabhängigkeit auf ein Nachlassen von Exekutivfunktionen mit dem Alter zurückzuführen sein könnte. Ein diesbezüglich durchgeführtes Kontrollexperiment konnte diese Hypothese jedoch nicht untermauern. Zusammengenommen kamen diese beiden Studien zu einem ähnlichen Ergebnis wie die vorliegende: Metakognitive Fähigkeiten nehmen in der Adoleszenz bis zum frühen Erwachsenenalter zunächst zu, gipfeln dann und lassen mit zunehmendem Alterungsprozess wieder nach. Das Maximum findet sich in den drei unterschiedlichen Studien nicht bei identischem Alter, dennoch bleibt die gezeigte Tendenz dieselbe. Unterschiede zwischen den einzelnen Ergebnissen könnten auf Unterschiede des Stimulus, der zeitlichen Abläufe sowie der Art, in welcher die Konfidenzbewertung erfolgte, zurückgeführt werden.

Dass es in der Adoleszenz zu einer Verbesserung von Selbsteinschätzung kommt, wurde in verschiedenen Studien gezeigt [82, 83]. Man kann spekulieren, dass bis zum frühen Erwachsenenalter diese Entwicklung weitgehend abgeschlossen ist und zu einer Verbesserung metakognitiver Fähigkeiten führt. Demgegenüber überwiegt ab einem gewissen Alter eine fortschreitende Abnahme [84, 85], mutmaßlich durch degenerative Alterungsprozesse von Gehirnarealen bedingt, welche für Metakognition eine relevante Rolle spielen (s. o.). Die genauen Zusammenhänge sind bislang nicht hinreichend untersucht und sollten Gegenstand zukünftiger Arbeiten darstellen.

Ein signifikanter Zusammenhang zwischen metakognitiver Sensitivität und Verzögerungsintervall konnte analog zu den anderen Wahrnehmungsparametern nicht gezeigt werden. Die Übereinstimmung zwischen objektiver und subjektiver Leistung wird folglich durch die untersuchten Latenzen nicht verändert, sondern stellt eine vom untersuchten zeitlichen Ablauf unabhängige höhere Wahrnehmungsleistung dar.

Bisher wurden die untersuchten Wahrnehmungsparameter getrennt voneinander diskutiert. Zur besseren Verständlichkeit sollen an dieser Stelle die Ergebnisse noch einmal in Kürze aus einem anderen Blickwinkel, und zwar mit einem Fokus auf die älteste Altersgruppe, beleuchtet werden. Im Rahmen der vorliegenden Studie wurden drei Aspekte visueller Wahrnehmung in Abhängigkeit vom Alter untersucht: die sensorische Diskriminationsfähigkeit visueller Bewegung, die kognitive Wahrnehmungsfähigkeit in Form der perzeptuellen Entscheidungssicherheit und die metakognitive Wahrnehmungsfähigkeit im Sinne der metakognitiven Sensitivität. Es konnte gezeigt werden, dass die sensorische Fähigkeit monoton mit dem Alter abnimmt (vgl. Abbildung 4), so zeigte Altersgruppe 5 die schlechtesten Diskriminationsleistungen. Auch in der Domäne der perzeptuellen Entscheidungssicherheit und der metakognitiven Entscheidungssicherheit bot Altersgruppe 5 die niedrigsten Werte (vgl. Abbildung 10 und Abbildung 16). Selektive Aufmerksamkeit verbesserte auch im Alter sensorische, kognitive und metakognitive Fähigkeiten (vgl. Abbildung 6, Abbildung 12, Abbildung 18), sogar besonders in Altersgruppe 5: In allen drei untersuchten Dimensionen zeigten sich hier die numerisch größten Unterschiede zwischen den Aufmerksamkeitsbedingungen. Der relative Aufmerksamkeitseffekt war für die metakognitive Sensitivität im hohen Alter sogar signifikant höher als in den jüngeren Dekaden. Mit anderen Worten, die Leistungen im Alter waren in besonderem Maße abhängig von der Aufmerksamkeit, die im validen Fall geeignet war, die Diskriminationsleistungen in die Nähe der Leistung der jüngeren Probanden zu bewegen – ohne diese jedoch ganz zu erreichen.

4.2 Diskussion der Augenbewegungsdaten im Experiment zur räumlichen Aufmerksamkeit

Um eventuelle Zusammenhänge zwischen Wahrnehmungsleistungen und dem Fixationsverhalten der Probanden zu erkennen, wurde für die aufgezeichneten Augendaten eine weitere gemischte ANOVA mit Messwiederholung errechnet, analog zur Analyse der Verhaltensparameter, mit den Variablen Aufmerksamkeitsbedingung, Alter und Verzögerungsstufe. Eine strikte Kontrolle der Augenbewegung im Zeitraum der Stimuluspräsentation zeigte, dass es keine statistisch signifikanten Zusammenhänge gab zwischen der Augenposition im Zeitraum der Stimuluspräsentation und den drei untersuchten Wahrnehmungsdomänen. Eine Abhängigkeit der Wahrnehmungsparameter vom Fixationsverhalten der Probanden konnte somit nicht belegt werden.

4.3 Diskussion der Verhaltensdaten im Experiment zur merkmalsbasierten Aufmerksamkeit

Im zweiten Teil dieser Studie wurde eine weitere essentielle Wahrnehmungsleistung und ihre Altersabhängigkeit untersucht: merkmalsbasierte Aufmerksamkeit. In diesem Teil der Studie bestand die Wahrnehmungsaufgabe darin, die globale Bewegungsrichtung eines von zwei übereinanderliegenden Punktkinematogrammen, die sich durch Farbe (rot oder grün) unterschieden, zu extrahieren. In diesem Experiment wurde ausschließlich die objektive Diskriminationsleistung der Probanden, nicht ihre perzeptuelle Entscheidungssicherheit und nicht die metakognitive Sensitivität erfasst. Auch wurde der zeitliche Ablauf nicht variiert. In diesem, im Vergleich zum ersten Experiment stark verkürzten Untersuchungsprotokoll, lag der Fokus ausschließlich auf dem Einfluss merkmalsbasierter Aufmerksamkeit.

Im Vergleich zum ersten Experiment bestand beim Experiment zur merkmalsbasierten Aufmerksamkeit eine besondere Schwierigkeit darin, dass der visuelle Stimulus aus zwei übereinanderliegenden Punktkinematogrammen bestand.

Merkmalsbasierte Aufmerksamkeit auszurichten ist jedoch auch möglich, wenn sich zwei Merkmale an nahezu demselben Ort befinden [55, 86]. Trotz dieser zusätzlich erschwerenden experimentellen Manipulation ergaben sich hinsichtlich der Diskriminationsleistung ähnliche Ergebnisse wie beim Experiment zur räumlichen Aufmerksamkeit. Wie erwartet, war in allen Gruppen die Wahrnehmungsleistung bei valider Aufmerksamkeitsbedingung besser als bei invalider (vgl. Abbildung 23). Diese Ergebnisse stimmen mit vorangegangenen Studien überein, die wiederholt zeigen konnten, dass merkmalsbasierte Aufmerksamkeit die Leistung in verschiedenen psychophysischen Wahrnehmungsexperimenten verbessert [36, 56, 87-89]. Dieser Effekt zeigte sich in allen Altersgruppen, so dass merkmalsbasierte Aufmerksamkeit auch im Alter die visuelle Wahrnehmungsleistung verbesserte. Eine signifikante Altersabhängigkeit des Aufmerksamkeitseffekts bestand nicht (vgl. Abbildung 24). Weiterhin konnten gezeigt werden, dass die Diskriminationsfähigkeit innerhalb der beiden Aufmerksamkeitsbedingungen signifikant altersabhängig war und mit zunehmendem Alter abnahm (vgl. Abbildung 22 und Abbildung 23). Auch diese Ergebnisse stehen im Einklang mit aktueller Literatur, die altersabhängige Einbußen in zum Teil ähnlichen visuellen Paradigmen zeigen konnte [90, 91]. Damit reproduziert dieses Experiment auch das entsprechende Ergebnis aus dem oben beschriebenen Experiment zur räumlichen Aufmerksamkeit.

Eine besondere Schwierigkeit der Diskrimination lag, wie oben beschrieben, in der überlappenden Darstellung der beiden unterschiedlichen Reize. Dies bedeutet, dass sich selbst bei maximaler Kohärenz der relevanten Punktwolke (100 % Kohärenz) zusammen mit den Punkten der anderen Wolke eine effektive Gesamtkohärenz von maximal 50 % ergab. Dies erklärt die deutlich schlechtere Diskriminationsleistung im Vergleich zum Test zur räumlichen Aufmerksamkeit (vgl. Abbildung 23).

4.4 Diskussion der Augenbewegungsdaten im Experiment zur merkmalsbasierten Aufmerksamkeit

Die ausgelesenen Augenpositionsdaten wurden in einer weiteren gemischten ANOVA mit Messwiederholung jeweils für die mittlere x- und die mittlere y-Position auf eventuelle Zusammenhänge mit der Aufmerksamkeitsbedingung und der Altersgruppe hin untersucht. Es zeigte sich zum Zeitpunkt der Präsentation des zu bewertenden Stimulus, weder bezüglich der Aufmerksamkeitsbedingungen noch der Altersgruppe ein signifikanter Zusammenhang. Auch hier ergab sich somit kein Hinweis darauf, dass die Wahrnehmungseffekte auf Unterschiede der Fixation zurückzuführen waren.

4.5 Diskussion des Aufmerksamkeitseffekts für räumliche und merkmalsbasierte Aufmerksamkeit im Vergleich

Sowohl für räumliche als auch für merkmalsbasierte Aufmerksamkeit wurden Verbesserungen der Diskriminationsleistungen beobachtet, die keine systematische Abhängigkeit vom Alter aufwiesen. Eine sich anschließende Frage lautete daher, ob und inwieweit diese Aufmerksamkeitseffekte auf Probandenebene korrelierten. Zur Klärung dieser Frage wurde pro Proband und Experiment jeweils der Aufmerksamkeitseffekt parametrisiert und dieser in einer partiellen Korrelationsanalyse zwischen beiden Experimenten gegenübergestellt. Auf den ersten Blick zeigte sich ein Zusammenhang: Probanden, die räumliche Aufmerksamkeit effektiv ausrichteten, wiesen einen vergleichbaren Effekt im Test zur merkmalsbasierten Aufmerksamkeit auf (vgl. Abbildung 25). Die Korrelation war jedoch wesentlich durch einen singulären Probanden bedingt. Nach Ausschluss des Ausreißers war der Zusammenhang nicht mehr gegeben (vgl. Abbildung 26).

Das Fehlen einer überzeugenden Korrelation zwischen den beiden Tests spricht dafür, dass die beiden Formen selektiver Aufmerksamkeit nicht identisch neuronal implementiert sind. Die Frage, ob unterschiedliche Aufmerksamkeitsentitä-

ten von unabhängigen neuronalen Strukturen vermittelt werden oder Ergebnis eines universellen „Aufmerksamkeitssystems“ sind, wurde in der Vergangenheit in zahlreichen Studien untersucht und zum Teil kontrovers diskutiert [92-95]. Es gibt Arbeiten, die die These stützen, dass es sich um voneinander unabhängige Prozesse handelt [92, 96, 97], andere Arbeiten weisen darauf hin, dass räumliche und merkmalsbasierte Aufmerksamkeit zumindest von ähnlichen frontoparietalen Netzwerken vermittelt werden [93, 98]. Insgesamt mehren sich Hinweise, dass es sich um eigenständige kognitive Prozesse handelt. Eine Studie von Hayden und Gallant von 2009 untersuchte zu dieser Fragestellung das Antwortverhalten von V4-Neuronen in einer Wahrnehmungsaufgabe unter Manipulation beider Aufmerksamkeitsmodalitäten [99]. Es konnten voneinander unabhängige Effekte beider Aufmerksamkeitsformen auf die Erregbarkeit und das Antwortverhalten visueller Neurone mit einer nur geringen zusätzlichen additiven Interaktion der beiden gezeigt werden. Hieraus wurde geschlossen, dass die Interaktion eine Steigerung der Erregbarkeit visueller Neurone durch eine Form von Aufmerksamkeit darstellen könnte, die den Einfluss der jeweils anderen Form erhöht. In anderen Worten bedeutet dies, dass es sich um zwei eigenständige kognitive Prozesse handelt, die jedoch vom Zustand des jeweils anderen abhängen und in synergistischer Weise interagieren. Diese Annahme steht im Einklang mit den Ergebnissen dieser Studie. Wie diese Synergie aussieht, welche Rolle genau die verschiedenen Aufmerksamkeitsentitäten bei Wahrnehmungsprozessen spielen, wie diese mit anderen kognitiven Vorgängen wechselwirken und sich auf das Verhalten auswirken, ist durch weitere Forschungsarbeiten zu klären.

5. Zusammenfassung

Dem Verständnis physiologischer und pathologischer Alterungsprozesse und ihrer Auswirkungen auf kognitive Fähigkeiten kommt in Zeiten des demografischen Wandels eine wachsende Bedeutung zu. Um hierzu beizutragen, wurden an einer Stichprobe von 50 gesunden Probanden zwischen dem 20. und dem 70. Lebensjahr Sehleistungen sowie kognitive und metakognitive Wahrnehmungsfähigkeiten in Abhängigkeit selektiver Aufmerksamkeit untersucht.

Unter kontrollierter, stationärer Fixation wurden zwei psychophysische Tests durchgeführt. Aufgabe der Probanden war es in beiden Tests, die Richtung eines von zwei Bewegungsreizen zu diskriminieren, welche simultan in der Gesichtsfeldperipherie präsentiert wurden. Nur einer der beiden Reize war relevant, der andere sollte ignoriert werden. Selektive Aufmerksamkeit wurde durch Hinweisreize geführt, welche in 80 % der Durchgänge den Diskriminationsreiz valide angekündigten (valide Aufmerksamkeitsbedingung). In 20 % der Durchgänge wurde am Ende eine Bewertung des zu ignorierenden Stimulus erfragt (invalide Aufmerksamkeitsbedingung). Selektive Aufmerksamkeit wurde entweder räumlich geführt (linkes oder rechtes Halbfeld, Experiment 1) oder auf ein bestimmtes Merkmal gerichtet (rote oder grüne Bewegungsreize, Experiment 2). Neben der Analyse der Diskriminationsleistungen wurden im ersten Experiment zwei weitere Wahrnehmungsdomänen erfasst. Erstens wurde die perzeptuelle Entscheidungssicherheit bestimmt, als ein Maß dafür, wie sicher sich der Proband der Richtigkeit seiner Wahrnehmungsleistung war. Diese Sicherheit wurde experimentell durch Erfragen eines virtuellen Wetteinsatzes in die Diskriminationsleistung operationalisiert. Zweitens wurde auf dem Boden der Signalentdeckungstheorie errechnet, wie gut objektive Wahrnehmungsleistung und subjektive Eigeneinschätzung tatsächlich übereinstimmten, ein Maß, das in der Literatur als metakognitive Sensitivität angesprochen wird.

Im Ergebnis zeigte sich in beiden Tests, dass die Fähigkeit visuelle Bewegung inmitten von Störsignalen zu extrahieren mit dem Alter abnimmt. Dieses Defizit hing nicht von der Zeit ab, die nach Reizpräsentation zur Analyse zur Verfügung

stand, und hatte kein Korrelat in Veränderungen der Fixationsleistung. Parallel zum Diskriminationsdefizit nahmen in Experiment 1 die Sicherheit in die eigene Wahrnehmungsleistung und auch die Validität, mit welcher die Eigeneinschätzung mit der objektiven Leistung übereinstimmte, im Alter ab. Im Gegensatz dazu waren die Effekte räumlicher und merkmalsbasierter Aufmerksamkeit über alle Altersgruppen hinweg sehr stabil. Auch in der höchsten Altersgruppe waren die Probanden sehr gut in der Lage, ihre Aufmerksamkeit selektiv auszurichten und dadurch ihre Diskriminationsleistungen zu verbessern.

Zusammenfassend nimmt die visuelle Bewegungsdiskrimination im Alter ab, ebenso die Fähigkeit, die eigene Diskriminationsleistung valide einzuschätzen. Selektive visuelle Aufmerksamkeit bleibt hingegen bis zum 70. Lebensjahr erhalten und stellt einen essentiellen Kompensationsmechanismus dar, die Wahrnehmungsleistungen aufrechtzuerhalten.

6. Verzeichnisse

6.1 Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

Abbildung 1: schematische Darstellung des zeitlichen Ablaufs des visuellen Stimulus beim Experiment zur räumlichen Aufmerksamkeit.	24
Abbildung 2: schematische Darstellung des zeitlichen Ablaufs des visuellen Stimulus beim Experiment zur merkmalsbasierten Aufmerksamkeit.	27
Abbildung 3: schematische Darstellung der ROC-Kurve.....	31
Abbildung 4: Darstellung des Diskriminationserfolgs für jede Altersgruppe.....	35
Abbildung 5: Darstellung des Diskriminationserfolgs für jede Altersgruppe und jede präsentierte Kohärenzstufe.....	36
Abbildung 6: Darstellung des Diskriminationserfolgs in Abhängigkeit von der Aufmerksamkeitsbedingung und der Altersgruppe	37
Abbildung 7: Darstellung des parametrisierten Aufmerksamkeitseffekts für jede Altersgruppe.....	38
Abbildung 8: Darstellung des Diskriminationserfolgs für jede Altersgruppe getrennt für die drei Verzögerungsstufen	39
Abbildung 9: Darstellung des Diskriminationserfolgs für die drei Verzögerungsstufen und in Abhängigkeit der Aufmerksamkeitsbedingung	40
Abbildung 10: Darstellung des Entscheidungssicherheitsindex in Abhängigkeit der Altersgruppe	42
Abbildung 11: Darstellung des Entscheidungssicherheitsindex für jede präsentierte Kohärenzstufe und jede Altersgruppe.....	43

Abbildung 12: Darstellung des Entscheidungssicherheitsindex in Abhängigkeit von der Aufmerksamkeitsbedingung und der Altersgruppe	44
Abbildung 13: Darstellung des parametrisierten Aufmerksamkeitseffekts in der Domäne perzeptuelle Entscheidungssicherheit in Abhängigkeit des Alters.....	45
Abbildung 14: Darstellung des Entscheidungssicherheitsindex für jede Altersgruppe und in Abhängigkeit der Verzögerungsstufe.....	46
Abbildung 15: Darstellung des Entscheidungssicherheitsindex für die drei Verzögerungsstufen, getrennt für die beiden Aufmerksamkeitsbedingungen...	47
Abbildung 16: Darstellung der metakognitiven Sensitivität in Anhängigkeit von der Altersgruppe	49
Abbildung 17: Darstellung der metakognitiven Sensitivität für jede präsentierte Kohärenzstufe und jede Altersgruppe	51
Abbildung 18: Darstellung der metakognitiven Sensitivität für die beiden Aufmerksamkeitsbedingungen und die verschiedenen Altersgruppen	52
Abbildung 19: Darstellung des parametrisierten Aufmerksamkeitseffekts in der Domäne metakognitive Sensitivität für jede Altersgruppe.....	53
Abbildung 20: Darstellung der metakognitiven Sensitivität in Abhängigkeit von der Aufmerksamkeitsbedingung und der Verzögerungsstufe	54
Abbildung 21: Darstellung der metakognitiven Sensitivität in Abhängigkeit der Verzögerungsstufe und der Altersgruppe.	55
Abbildung 22: Darstellung des Diskriminationserfolgs für jede Altersgruppe....	58
Abbildung 23: Darstellung des Diskriminationserfolgs für beide Aufmerksamkeitsbedingungen und getrennt für jede Altersgruppe.	60

Abbildung 24: Darstellung des parametrisierten Aufmerksamkeitseffekts getrennt für die fünf Altersgruppen	61
Abbildung 25: Darstellung des Zusammenhangs zwischen räumlicher und merkmalsbasierter Aufmerksamkeit auf Einzelprobandenebene (n = 48)	63
Abbildung 26: : Darstellung des Zusammenhangs zwischen räumlicher und merkmalsbasierter Aufmerksamkeit nach Ausschluss des Ausreißers auf Einzelprobandenebene (n = 47)	64
Tabelle 1: Schematische Darstellung der verschiedenen Kombinationsmöglichkeiten aus korrekter und falscher Antwort und hoher und niedriger Konfidenz bei der absolvierten Wahrnehmungsaufgabe.....	30

6.2 Literaturverzeichnis

1. Bennett, P.J., R. Sekuler, and A.B. Sekuler, *The effects of aging on motion detection and direction identification*. *Vision Res*, 2007. 47(6): p. 799–809
2. Bundesamt, S., *Herausforderungen des demografischen Wandels, Expertise im Auftrag der Bundesregierung 2011*: Sachverständigenrat zur Begutachtung der gesamtwirtschaftlichen Entwicklung, Bonifatius GmbH Buch-Druck-Verlag, 33042 Paderborn.
3. *WHO warnt vor Folgen alternder Bevölkerung für Gesundheitssysteme*. *Deutsches Ärzteblatt 2014* (Zugriff 15.11.2016); Available from: <http://www.aerzteblatt.de/nachrichten/60776/WHO-warnt-vor-Folgen-alternder-Bevoelkerung-fuer-Gesundheitssysteme>.
4. Lai, S.M., S. Studenski, P.W. Duncan, and S. Perera, *Persisting consequences of stroke measured by the Stroke Impact Scale*. *Stroke*, 2002. 33(7): p. 1840-4.
5. Dubois, B. and B. Pillon, *Cognitive deficits in Parkinson's disease*. *J Neurol*, 1997. 244(1): p. 2-8.
6. Perrine, K. and T. Kiolbasa, *Cognitive deficits in epilepsy and contribution to psychopathology*. *Neurology*, 1999. 53(5 Suppl 2): p. S39-48.
7. Harder, H., H. Holtel, J.E. Bromberg, P. Poortmans, H. Haaxma-Reiche, H.C. Kluin-Nelemans, J. Menten, and M.J. van den Bent, *Cognitive status*

and quality of life after treatment for primary CNS lymphoma. *Neurology*, 2004. 62(4): p. 544-7.

8. Mercier, L., T. Audet, R. Hebert, A. Rochette, and M.F. Dubois, *Impact of motor, cognitive, and perceptual disorders on ability to perform activities of daily living after stroke*. *Stroke*, 2001. 32(11): p. 2602-8.
9. Kerkhoff, G., *Neurovisual rehabilitation: recent developments and future directions*. *J Neurol Neurosurg Psychiatry*, 2000. 68(6): p. 691-706.
10. Kerkhoff, G., *Restorative and compensatory therapy approaches in cerebral blindness - a review*. *Restor Neurol Neurosci*, 1999. 15(2-3): p. 255-71.
11. Betts, L.R., A.B. Sekuler, and P.J. Bennett, *The effects of aging on orientation discrimination*. *Vision Res*, 2007. 47(13): p. 1769-80.
12. Richards, O.W., *Effects of luminance and contrast on visual acuity, ages 16 to 90 years*. *Am J Optom Physiol Opt*, 1977. 54(3): p. 178-84.
13. Madden, D.J. and L.K. Langley, *Age-related changes in selective attention and perceptual load during visual search*. *Psychol Aging*, 2003. 18(1): p. 54-67.
14. Trick, G.L. and S.E. Silverman, *Visual sensitivity to motion: age-related changes and deficits in senile dementia of the Alzheimer type*. *Neurology*, 1991. 41(9): p. 1437-40.
15. Haarmeier, T., *Wahrnehmungsdefizite für Farben, Objekte und Bewegung*. *InFo Neurologie & Psychiatrie*, 2011. 13(12): p. 44-48.
16. Owsley, C., *Aging and vision*. *Vision Res*, 2011. 51(13): p. 1610-22.
17. Lam, B., *Maturation, aging and testing in infants*. *Electrophysiology of vision: Clinical testing and applications*. Boca Raton, FL: Taylor & Francis Group, 2005: p. 151–173.
18. Hua, T., X. Li, L. He, Y. Zhou, Y. Wang, and A.G. Leventhal, *Functional degradation of visual cortical cells in old cats*. *Neurobiol Aging*, 2006. 27(1): p. 155-62.
19. Leventhal, A.G., Y. Wang, M. Pu, Y. Zhou, and Y. Ma, *GABA and its agonists improved visual cortical function in senescent monkeys*. *Science*, 2003. 300(5620): p. 812-5.
20. Yu, S., Y. Wang, X. Li, Y. Zhou, and A.G. Leventhal, *Functional degradation of extrastriate visual cortex in senescent rhesus monkeys*. *Neuroscience*, 2006. 140(3): p. 1023-9.

21. Madden, D.J., T.G. Turkington, J.M. Provenzale, L.L. Denny, L.K. Langley, T.C. Hawk, and R.E. Coleman, *Aging and attentional guidance during visual search: functional neuroanatomy by positron emission tomography*. Psychol Aging, 2002. 17(1): p. 24-43.
22. Grady, C.L., A.R. McIntosh, B. Horwitz, and S.I. Rapoport, *Age-related changes in the neural correlates of degraded and nondegraded face processing*. Cogn Neuropsychol, 2000. 17(1): p. 165-86.
23. Rypma, B. and M. D'Esposito, *Isolating the neural mechanisms of age-related changes in human working memory*. Nat Neurosci, 2000. 3(5): p. 509-15.
24. Davis, S.W., N.A. Dennis, S.M. Daselaar, M.S. Fleck, and R. Cabeza, *Que PASA? The posterior-anterior shift in aging*. Cereb Cortex, 2008. 18(5): p. 1201-9.
25. Ilg, U., Thier, P., *Neuronale Grundlagen visueller Wahrnehmung*, in *Kognitive Neurowissenschaften*, H.-O. Karnath and P. Thier, Editors. 2012, Springer. p. 35-43.
26. Grill-Spector, K. and R. Malach, *The human visual cortex*. Annu Rev Neurosci, 2004. 27: p. 649-77.
27. Van Essen, D.C., J.W. Lewis, H.A. Drury, N. Hadjikhani, R.B. Tootell, M. Bakircioglu, and M.I. Miller, *Mapping visual cortex in monkeys and humans using surface-based atlases*. Vision Res, 2001. 41(10-11): p. 1359-78.
28. Nys, G.M., M.J. van Zandvoort, P.L. de Kort, B.P. Jansen, E.H. de Haan, and L.J. Kappelle, *Cognitive disorders in acute stroke: prevalence and clinical determinants*. Cerebrovasc Dis, 2007. 23(5-6): p. 408-16.
29. Kersten, D., P. Mamassian, and A. Yuille, *Object perception as Bayesian inference*. Annu Rev Psychol, 2004. 55: p. 271-304.
30. Gold, J.I. and M.N. Shadlen, *The neural basis of decision making*. Annu Rev Neurosci, 2007. 30: p. 535-74.
31. Kording, K.P. and D.M. Wolpert, *Bayesian integration in sensorimotor learning*. Nature, 2004. 427(6971): p. 244-7.
32. Von Helmholtz, H., *Handbuch der physiologischen Optik*. Vol. 9. 1867: Voss.
33. Fleming, S.M., R.J. Dolan, and C.D. Frith, *Metacognition: computation, biology and function*. Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci, 2012. 367(1594): p. 1280-6.

34. Resulaj, A., R. Kiani, D.M. Wolpert, and M.N. Shadlen, *Changes of mind in decision-making*. Nature, 2009. 461(7261): p. 263-6.
35. Kiani, R. and M.N. Shadlen, *Representation of confidence associated with a decision by neurons in the parietal cortex*. Science, 2009. 324(5928): p. 759-64.
36. Zizlsperger, L., T. Sauvigny, and T. Haarmeier, *Selective attention increases choice certainty in human decision making*. PLoS One, 2012. 7(7): p. e41136.
37. Akturk, A.O. and I. Sahin, *Literature Review on Metacognition and its Measurement*. Procedia Social and Behavioral Sciences 2011. 15: p. 3731–3736.
38. Wilson, J., *Assessing Metacognition: Legitimizing Metacognition as a Teaching Goal*. Reflect, 1998. 4(1): p. 14-20.
39. Flavell, J.H., *Metacognitive Aspects of Problem Solving*, in *The Nature of Intelligence*. 1976, L. Resnick (Ed.), Hillsdale, New Jersey: Lawrence Erlbaum Associates. p. 231-236.
40. Georghiadis, P., *From the General to the Situated: Three Decades of Metacognition*. International Journal of Science Education, 2004. 26(3): p. 365-383.
41. Overgaard, M. and K. Sandberg, *Kinds of access: different methods for report reveal different kinds of metacognitive access*. Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci, 2012. 367(1594): p. 1287-96.
42. Fleming, S.M. and H.C. Lau, *How to measure metacognition*. Front Hum Neurosci, 2014. 8: p. 443.
43. Maniscalco, B. and H. Lau, *A signal detection theoretic approach for estimating metacognitive sensitivity from confidence ratings*. Conscious Cogn, 2012. 21(1): p. 422-30.
44. Zizlsperger, L., T. Sauvigny, B. Handel, and T. Haarmeier, *Cortical representations of confidence in a visual perceptual decision*. Nat Commun, 2014. 5: p. 3940.
45. Filley, C.M. and C.M. Cullum, *Attention and vigilance functions in normal aging*. Appl Neuropsychol, 1994. 1(1-2): p. 29-32.
46. Newsome, W.T. and E.B. Pare, *A selective impairment of motion perception following lesions of the middle temporal visual area (MT)*. J Neurosci, 1988. 8(6): p. 2201-11.

47. Shadlen, M.N. and W.T. Newsome, *Motion perception: seeing and deciding*. Proc Natl Acad Sci U S A, 1996. 93(2): p. 628-33.
48. Shadlen, M.N. and W.T. Newsome, *Neural basis of a perceptual decision in the parietal cortex (area LIP) of the rhesus monkey*. J Neurophysiol, 2001. 86(4): p. 1916-36.
49. Handel, B., W. Lutzenberger, P. Thier, and T. Haarmeier, *Selective attention increases the dependency of cortical responses on visual motion coherence in man*. Cereb Cortex, 2008. 18(12): p. 2902-8.
50. Handel, B., W. Lutzenberger, P. Thier, and T. Haarmeier, *Opposite dependencies on visual motion coherence in human area MT+ and early visual cortex*. Cereb Cortex, 2007. 17(7): p. 1542-9.
51. Lieberman, H. and A. Pentland, *Microcomputer-based estimation of psychophysical thresholds: the Best PEST*. Behav Res Meth and Instr, 1982. 14: p. 21-25.
52. Persaud, N., P. McLeod, and A. Cowey, *Post-decision wagering objectively measures awareness*. Nat Neurosci, 2007. 10(2): p. 257-61.
53. Grimaldi, P., H. Lau, and M.A. Basso, *There are things that we know that we know, and there are things that we do not know we do not know: Confidence in decision-making*. Neurosci Biobehav Rev, 2015. 55: p. 88-97.
54. Cohen, M.R. and J.H. Maunsell, *Using neuronal populations to study the mechanisms underlying spatial and feature attention*. Neuron, 2011. 70(6): p. 1192-204.
55. Maunsell, J.H. and S. Treue, *Feature-based attention in visual cortex*. Trends Neurosci, 2006. 29(6): p. 317-22.
56. Saenz, M., G.T. Buracas, and G.M. Boynton, *Global feature-based attention for motion and color*. Vision Res, 2003. 43(6): p. 629-37.
57. Snowden, R.J. and E. Kavanagh, *Motion perception in the ageing visual system: minimum motion, motion coherence, and speed discrimination thresholds*. Perception, 2006. 35(1): p. 9-24.
58. Ball, K. and R. Sekuler, *Improving visual perception in older observers*. J Gerontol, 1986. 41(2): p. 176-82.
59. Mateus, C., R. Lemos, M.F. Silva, A. Reis, P. Fonseca, B. Oliveiros, and M. Castelo-Branco, *Aging of low and high level vision: from chromatic and achromatic contrast sensitivity to local and 3D object motion perception*. PLoS One, 2013. 8(1): p. e55348.

60. Gilmore, G.C., H.E. Wenk, L.A. Naylor, and T.A. Stuve, *Motion perception and aging*. Psychol Aging, 1992. 7(4): p. 654-60.
61. Madden, D.J., *Aging and Visual Attention*. Curr Dir Psychol Sci, 2007. 16(2): p. 70-74.
62. Schmidt, B.K., E.K. Vogel, G.F. Woodman, and S.J. Luck, *Voluntary and automatic attentional control of visual working memory*. Percept Psychophys, 2002. 64(5): p. 754-63.
63. Luck, S.J. and E.K. Vogel, *Visual working memory capacity: from psychophysics and neurobiology to individual differences*. Trends Cogn Sci, 2013. 17(8): p. 391-400.
64. Luck, S.J. and E.K. Vogel, *The capacity of visual working memory for features and conjunctions*. Nature, 1997. 390(6657): p. 279-81.
65. Ketcham, C.J. and G.E. Stelmach, *Movement Control in the Older Adult*, in *Technology for adaptive aging*, R.W. Pew and S.B. van Hemel, Editors. 2004, Washington, DC: The National Academies Press. p. 64-92.
66. Porciatti, V., A. Fiorentini, M.C. Morrone, and D.C. Burr, *The effects of ageing on reaction times to motion onset*. Vision Res, 1999. 39(12): p. 2157-64.
67. Kosnik, W., L. Winslow, D. Kline, K. Rasinski, and R. Sekuler, *Visual changes in daily life throughout adulthood*. J Gerontol, 1988. 43(3): p. P63-70.
68. Wilimzig, C., N. Tsuchiya, M. Fahle, W. Einhauser, and C. Koch, *Spatial attention increases performance but not subjective confidence in a discrimination task*. J Vis, 2008. 8(5): p. 7 1-10.
69. Kunitomo, C., J. Miller, and H. Pashler, *Confidence and accuracy of near-threshold discrimination responses*. Conscious Cogn, 2001. 10(3): p. 294-340.
70. Dodson, C.S., S. Bawa, and L.E. Krueger, *Aging, metamemory, and high-confidence errors: a misrecollection account*. Psychol Aging, 2007. 22(1): p. 122-33.
71. Dodson, C.S., S. Bawa, and S.D. Slotnick, *Aging, source memory, and misrecollections*. J Exp Psychol Learn Mem Cogn, 2007. 33(1): p. 169-81.
72. Palmer, E.C., A.S. David, and S.M. Fleming, *Effects of age on metacognitive efficiency*. Conscious Cogn, 2014. 28: p. 151-60.

73. Weil, L.G., S.M. Fleming, I. Dumontheil, E.J. Kilford, R.S. Weil, G. Rees, R.J. Dolan, and S.J. Blakemore, *The development of metacognitive ability in adolescence*. *Conscious Cogn*, 2013. 22(1): p. 264-71.
74. Galvin, S.J., J.V. Podd, V. Drga, and J. Whitmore, *Type 2 tasks in the theory of signal detectability: discrimination between correct and incorrect decisions*. *Psychon Bull Rev*, 2003. 10(4): p. 843-76.
75. Maniscalco, B. and H. Lau, *Manipulation of working memory contents selectively impairs metacognitive sensitivity in a concurrent visual discrimination task*. *Neuroscience of Consciousness*, 2015. 2015(1): p. 1-13.
76. McCurdy, L.Y., B. Maniscalco, J. Metcalfe, K.Y. Liu, F.P. de Lange, and H. Lau, *Anatomical coupling between distinct metacognitive systems for memory and visual perception*. *J Neurosci*, 2013. 33(5): p. 1897-906.
77. Maniscalco, B., M.A. Peters, and H. Lau, *Heuristic use of perceptual evidence leads to dissociation between performance and metacognitive sensitivity*. *Atten Percept Psychophys*, 2016. 78(3): p. 923-37.
78. Zizlsperger, L., F. Kummel, and T. Haarmeier, *Metacognitive Confidence Increases with, but Does Not Determine, Visual Perceptual Learning*. *PLoS One*, 2016. 11(3): p. e0151218.
79. Rounis, E., B. Maniscalco, J.C. Rothwell, R.E. Passingham, and H. Lau, *Theta-burst transcranial magnetic stimulation to the prefrontal cortex impairs metacognitive visual awareness*. *Cogn Neurosci*, 2010. 1(3): p. 165-75.
80. Fleming, S.M., J. Huijgen, and R.J. Dolan, *Prefrontal contributions to metacognition in perceptual decision making*. *J Neurosci*, 2012. 32(18): p. 6117-25.
81. Fleming, S.M., R.S. Weil, Z. Nagy, R.J. Dolan, and G. Rees, *Relating introspective accuracy to individual differences in brain structure*. *Science*, 2010. 329(5998): p. 1541-3.
82. Demetriou, A. and K. Bakracevic, *Reasoning and self-awareness from adolescence to middle age: Organization and development as a function of education*. *Learning and Individual Differences*, 2009. 19: p. 181–194.
83. Sebastian, C., S. Burnett, and S.J. Blakemore, *Development of the self-concept during adolescence*. *Trends Cogn Sci*, 2008. 12(11): p. 441-6.
84. Ross, L.A., J.E. Dodson, J.D. Edwards, M.L. Ackerman, and K. Ball, *Self-rated driving and driving safety in older adults*. *Accid Anal Prev*, 2012. 48: p. 523-7.

85. Bender, A.R. and N. Raz, *Age-related differences in recognition memory for items and associations: contribution of individual differences in working memory and metamemory*. Psychol Aging, 2012. 27(3): p. 691-700.
86. Scolari, M., E.F. Ester, and J.T. Serences, *Feature- and object-based attentional modulation in the human visual system*, in *Oxford handbook of attention* K. Nobre and S. Kastner, Editors. 2014, 'Oxford University Press', Oxford, UK: Oxford University.
87. Cohen, A. and H. Magen, *Intra- and cross-dimensional visual search for single-feature targets*. Percept Psychophys, 1999. 61(2): p. 291-307.
88. Rossi, A.F. and M.A. Paradiso, *Feature-specific effects of selective visual attention*. Vision Res, 1995. 35(5): p. 621-34.
89. Found, A. and H.J. Muller, *Searching for unknown feature targets on more than one dimension: investigating a "dimension-weighting" account*. Percept Psychophys, 1996. 58(1): p. 88-101.
90. Quigley, C., S.K. Andersen, L. Schulze, M. Grunwald, and M.M. Muller, *Feature-selective attention: evidence for a decline in old age*. Neurosci Lett, 2010. 474(1): p. 5-8.
91. Quigley, C. and M.M. Muller, *Feature-selective attention in healthy old age: a selective decline in selective attention?* J Neurosci, 2014. 34(7): p. 2471-6.
92. McAdams, C.J. and J.H. Maunsell, *Attention to both space and feature modulates neuronal responses in macaque area V4*. J Neurophysiol, 2000. 83(3): p. 1751-5.
93. Kastner, S. and L.G. Ungerleider, *Mechanisms of visual attention in the human cortex*. Annu Rev Neurosci, 2000. 23: p. 315-41.
94. Raz, A. and J. Buhle, *Typologies of attentional networks*. Nat Rev Neurosci, 2006. 7(5): p. 367-79.
95. Treue, S., *Neural correlates of attention in primate visual cortex*. Trends Neurosci, 2001. 24(5): p. 295-300.
96. Hayden, B.Y. and J.L. Gallant, *Time course of attention reveals different mechanisms for spatial and feature-based attention in area V4*. Neuron, 2005. 47(5): p. 637-43.
97. Treue, S. and J.C. Martinez Trujillo, *Feature-based attention influences motion processing gain in macaque visual cortex*. Nature, 1999. 399(6736): p. 575-9.

98. Giesbrecht, B., M.G. Woldorff, A.W. Song, and G.R. Mangun, *Neural mechanisms of top-down control during spatial and feature attention*. Neuroimage, 2003. 19(3): p. 496-512.
99. Hayden, B.Y. and J.L. Gallant, *Combined effects of spatial and feature-based attention on responses of V4 neurons*. Vision Res, 2009. 49(10): p. 1182-7.

7. Anhang

7.1 Erklärung zum Eigenanteil

Die vorliegende Dissertation basiert auf einer Studie der Klinik für Neurologie am Universitätsklinikum Tübingen, die unter der Betreuung von Prof. Dr. Thomas Haarmeier durchgeführt wurde. Das Studiendesign wurde in Zusammenarbeit mit Prof. Dr. Thomas Haarmeier und Dr. Leopold Zizlsperger entwickelt. Die zugrunde liegenden Daten sämtlicher Abbildungen und Analysen habe ich eigenständig sowie in Zusammenarbeit mit Yvonne Rauscher erhoben. Die statische Datenanalyse erfolgte unter Anleitung durch Dr. Leopold Zizlsperger und Prof. Dr. Thomas Haarmeier durch mich persönlich. Das vorliegende Manuskript habe ich selbstständig verfasst. Hierbei habe ich keine anderen Quellen verwendet, als die im Literaturverzeichnis genannten. Die Literatur- und Datenrecherche führte ich selbstständig und mit Unterstützung von Dr. Leopold Zizlsperger durch. Die Korrektur des Manuskripts erfolgte durch Prof. Dr. Thomas Haarmeier und Dr. Leopold Zizlsperger.

Tübingen, den 24. Januar 2017

Hanna Christine Eitler-Klenk

7.2 Danksagung

Meinem Doktorvater Prof. Dr. Thomas Haarmeier gilt mein besonderer Dank. Für die Möglichkeit einer Promotion in seiner Arbeitsgruppe und die beispiellose Unterstützung in fachlichen und methodischen Belangen über Jahre hinweg. Vor allem jedoch auch dafür, dass durch unsere Zusammenarbeit meine Begeisterung für das Fach Neurologie geweckt und gefördert wurde, die meine weitere berufliche Entwicklung maßgeblich beeinflusste. Sein didaktisches Talent, die Fähigkeit auch komplexe Zusammenhänge verständlich darstellen zu können und die Zuversicht, die er durch seine freundschaftliche und ambitionierte Art zu jedem Zeitpunkt der Promotion zu vermitteln wusste, werden mir in besonderer Erinnerung bleiben und immer ein Vorbild sein.

Bedanken möchte ich mich vor allem auch bei Dr. Leopold Zizlsperger, der mir während der gesamten Promotionszeit ein besonders elementarer Ratgeber und Unterstützer war und ohne dessen Mitarbeit diese Arbeit nicht zustande gekommen wäre. Sein unerschöpfliches Engagement zu jeder Tages- und Nachtzeit, über Landes- und Kontinentgrenzen hinweg sucht seinesgleichen.

Meinen Freunden möchte ich danken, dass sie in den langen Jahren des Medizinstudiums und der Promotion, mit allen Höhen und Tiefen, immer an meiner Seite waren. V. a. Yvonne Rauscher danke ich für die tolle Zusammenarbeit. Zu wissen, dass immer jemand mit am selben Strang zieht, war mir eine unschätzbare Hilfe.

Meinen Eltern danke ich dafür, dass sie mir mein Studium und damit diese Promotion ermöglicht haben, mich stets unterstützt und an mich geglaubt haben.

Mein besonderer Dank gilt meiner Schwester Eva, ohne die ich heute nicht wäre, wer ich bin und dem besten Schwager von allen, auf deren außergewöhnlichen Rückhalt ich immer bauen kann.

Mein größter Dank gebührt meinem Mann Tobias, der mich vervollständigt.