Psychosensorische Pupillendilatation bei bewusster und unbewusster visueller Informationsverarbeitung

Untersuchungen an normalsichtigen Probanden und Hemianopikern

Inaugural-Dissertation

zur
Erlangung des Doktorgrades der
Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät
der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf

vorgelegt von
Christof Loose
aus Düsseldorf

Düsseldorf
2004

Gedruckt mit der Genehmigung der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf

Referentin: Prof. Dr. P. Stoerig
Koreferent: Prof. Dr. R. Pietrowsky

Tag der mündlichen Prüfung: 21. 01. 2005

Psychosensorische Pupillendilatation bei bewusster und unbewusster visueller Informationsverarbeitung

Untersuchungen an normalsichtigen Probanden und Hemianopikern

Inaugural-Dissertation

zur
Erlangung des Doktorgrades der
Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät
der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf

vorgelegt von
Christof Loose
aus Düsseldorf

Düsseldorf
2004

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich allen, die mir bei der Erstellung dieser Arbeit in irgendeiner Form behilflich waren, meinen Dank sagen, insbesondere Frau Prof. Dr. P. Stoerig, die mir wichtige Anregungen und Verbesserungsvorschläge gegeben hat.
Ein besonderer Dank geht aber auch an meine Frau und meine Kinder, die mich in jeder nur erdenklichen Weise unterstützt haben; ihnen mochte ich die folgende Seite widmen.

Für
Andrea, Max und Leo

Inhalt

Danksagung **4**

0.0 Zusammenfassung ..... **- 9 -**

1.0 Einleitung **10**

1.1 Typologie von Gesichtsfeldausfällen 10

1.2 Behandlung von Gesichtsfeldausfällen und deren Prognose 11

1.3 Ziel der Arbeit 13

1.4 Begriffliches 14

2.0 Blindsehen: Was ist das? **15**

2.1 Historie des Blindsehens 16

2.1.1 Blindsehbefunde beim Menschen 17

2.2 Ebenen von Blindsehfunktionen 18

2.2.1 Neuroendokrine Antworten 18

2.2.2 Reflexive Antworten 18

2.2.3 Indirekte Untersuchungsverfahren 20

2.2.4 Direkte Verfahren 20

2.3 Funktionelle Neuroanatomie des Blindsehens 20

2.3.1 Wie wird Blindsehen neuronal vermittelt? 20

2.3.2 Welche anatomischen Konsequenzen hat ein V1-Läsion? 22

2.3.3 Welche Funktion hat Blindsehen? 23

3.0 Anatomie und Physiologie der Pupille **24**

3.1 Das Auge im Querschnitt 24

3.2 Aufbau und Innervation der Iris 25

3.3 Stand der allgemeinen Pupillenforschung 28

3.3.1 Primäre Pupillenfunktionen 28

3.3.2 Klinischer Nutzen der Pupillenfunktionen 28

3.3.3 Übersicht weiterer Einflussfaktoren auf das Pupillenverhalten 29

3.4 Psychosensorische Pupillenreaktionen 32

3.4.1 Anwendungsgebiete der psychosensorischen Reaktionen 33

3.4.2 Pupillometrie beim Blindsehen 36

3.4.3 Der „Stimulus-Probability-Effect“ (SPE) 39

3.5 Vorläufige Zusammenfassung und Hypothesengenerierung 40

4.0 Allgemeiner Methodenteil **41**

4.1 Ort und Zeitraum der Untersuchungen 41

4.2 Stichprobe 42

4.3 Technische Ausrüstung 43

4.3.1 „Tübinger Perimeter“: Die Messung des Gesichtsfeldes 43

4.3.2 „iView®“: Augenbewegungs- und Pupillenmess-System 45

4.3.3 PC: Hard- und Software 48

4.4 Pupillometrische Parameter 48

4.5 Auswertung der psychophysischen und pupillometrischen Daten 49
4.5.1 Pupillometrische Datensammlung, - filterung und - analyse..... 49
4.5.2 Psychophysische Datensammlung, - filterung und - analyse 52
4.5.3 Zusammenfügung psychophysischer und pupillometrischer Daten 53

5.0 Experimental-Phase A **57**

5.1 A1: „Empfindungs-Experiment" 58
5.1.1 A1: Hypothesen 58
5.1.2 A1: Stichprobe und Untersuchungszeitraum 59
5.1.3 A1: Versuchsdesign und Trialaufbau 59
5.1.4 A1: Versuchsdurchführung und Vp-Instruktion 62
5.1.5 A1: Ergebnisse 63
5.1.6 A1: Psychophysik 63
5.1.7 A1: Pupillometrie und Korrespondenz zur Psychophysik 64
5.1.8 A1: Diskussion 69

5.2 A2: Einzelfall-Studie (Teil 1: Stimulus-Wahrscheinlichkeiten) 74
5.2.1 A2: Einleitung (1) 74
5.2.2 A2: Hypothesen (1) 75
5.2.3 A2: Untersuchungszeitraum (1) 76
5.2.4 A2: Trialaufbau und Versuchsdesign (1) 76
5.2.5 A2: Ergebnisse (1) 77
5.2.6 A2: Psychophysik (1) 77
5.2.7 A2: Pupillometrie und Korrespondenz zur Psychophysik (1) 78
5.2.8 A2: Diskussion (1) 80

5.3 A2: Einzelfall-Studie (Teil 2: Naso-temporale Asymmetrie) 82
5.3.1 A2: Einleitung (2) 82
5.3.2 A2: Hypothesen (2) 84
5.3.3 A2: Trialaufbau und Versuchsdesign (2) 84
5.3.4 A2: Ergebnisse (2) 85
5.3.5 A2: Psychophysik (2) 86
5.3.6 A2: Pupillometrie und Korrespondenz zur Psychophysik (2) 86
5.3.7 A2: Diskussion (2) 89

5.4 A2: Einzelfall-Studie (Teil 3: Aufmerksamkeit) 91
5.4.1 A2:Einleitung (3) 91
5.4.2 A2: Hypothesen (3) 92
5.4.3 A2: Experimentelles Setting (3) 93
5.4.4 A2: Ergebnisse (3) 93
5.4.5 A2: Diskussion (3) 96

6.0 Experimental-Phase B **99**

6.1 B1: „Entdeckungs-Experiment" 99
6.1.1 B1: Hypothesen 100
6.1.2 B1: Stichprobe und Untersuchungszeitraum 100
6.1.3 B1: Versuchsdesign und Trialaufbau 101
6.1.4 B1: Versuchsdurchführung 104
6.1.5 B1: Ergebnisse 106
6.1.6 B1: Pupillometrie 110
6.1.7 B1: Korrespondenz zwischen Psychophysik und Pupillometrie 113
6.1.8 B1: Diskussion 116

6.2 B2: Experiment „Happy vs. Sad" 120
6.2.1 B2: Hypothesen 121
6.2.2 B2: Stichprobe und Untersuchungszeitraum 122
6.2.3 B2:Versuchsdesign und Trialaufbau 122

6.2.4 B2: Versuchsdurchführung und Vp-Instruktion 124
6.2.5 B2: Ergebnisse (Psychophysik) 126
6.2.6 B2: Pupillometrie 128
6.2.7 B2: Korrespondenz der Psychophysik und Pupillometrie 131
6.2.8 B2: Diskussion 132

7.0 Allgemeine Diskussion (A1, A2, B1, B2) **135**
7.1 Ergebnisse im Überblick 135
7.2 Beziehungen von SPE, visueller Bewusstheit und psychophysischer Leistung 137
7.3 Ergebnisdarstellung im Lichte vorheriger Blindseh-Studien 138
7.4 Erfassung der visuellen Bewusstheit 142
7.5 Ist der SPE als psychophysiologisches Maß sinnvoll? (Störvariablen) 144
7.6 Anwendung und Ausblick 147

8.0 Literatur **148**

9.0 Anhang **156**

0.0 Zusammenfassung

Um herauszufinden, ob die Messung der Pupillenweite auf ‚ungesehene' Reize eine größere Sensitivität als psychophysische Rateverfahren aufweist, wurden vier Experimente mit zentral sehgeschädigten (hemianopen) und zwei mit normalsichtigen Probanden[1] durchgeführt. Die visuelle Stimulation war einmal überschwellig, d.h. für die Probanden gut sichtbar, und ein andermal unterschwellig bzw. schwellennah: Letztere Bedingung sah bei Normalsichtigen eine sehr kurze maskierte Reizdarbietung vor, während bei den Sehgeschädigten das blinde Gesichtsfeld stimuliert wurde. Parallel zur Pupillenaufzeichnung mussten die Probanden entscheiden, ob ein Reiz präsentiert worden war oder nicht (Zwei-Wahl-Rate-Verfahren; 2-AFC).

Anders als in veröffentlichten Ergebnissen, die eine recht gute Übereinstimmung zwischen der psychophysisch bestimmten Leistung und frühen, 200-500 ms nach Reizbeginn einsetzenden Pupillenreaktionen zeigten (Weiskrantz, 1999), wurden hier späte, nicht auf die Reizdarbietung selbst, sondern auf die Wahrscheinlichkeit ihres Auftretens bezogene Pupillenreaktionen verwendet. Dieser Stimulus-Wahrscheinlichkeits-Effekt (SPE), dessen Ausprägung mit der bewussten Abbildung des Reizes korrelieren soll (Hakarem & Sutton, 1966), wurde hier eingesetzt, um den Zusammenhang zwischen visueller Bewusstheit, reizgesteuerten Verhalten und Pupillenreaktion zu beleuchten. Dabei zeigte sich, dass der SPE nicht nur auftritt, wenn der Reiz bewusst gesehen wird, sondern auch dann nachweisbar ist, wenn die bewusste Abbildung aufgrund einer partiellen Rindenblindheit nicht mehr möglich ist. War die bewusste Reizabbildung dagegen reduziert, blieb er aus oder trat nur schwach in Erscheinung. Während unter reduzierten, gelegentlich auch unter normalen Sehbedingungen die psychophysische Methode also bessere Evidenz für die Reizverarbeitung lieferte, erwies sich die pupillometrische Messung des SPE bei fehlender Reizabbildung als sensitiver.

Aufgrund ihrer Sensitivität bei völligem Fehlen von visueller Bewusstheit – wie sie bei rindenblinden Patienten (im blinden Gesichtsfeld) vorliegt –, kann durch Messung des SPE innerhalb relativ kurzer Zeit (2 Stunden Experimente, 2 Stunden Auswertung) festgestellt werden, ob die ungesehenen Reize implizit verarbeitet werden. Dies gilt vor allem, wenn die psychophysisch bestimmte Entdeckungsleistung auf Zufallsniveau liegt.

[1] Es wird der Einfachheit halber die männliche Form verwendet, um Gruppen von Personen zu benennen.

1.0 Einleitung

In Deutschland trägt ca. jeder vierte Mensch, der eine Gehirnläsion erlitten hat, eine Sehstörung davon (Kerkoff et al., 1992). Das häufigste Symptom einer solchen Sehstörung ist ein Gesichtsfeldausfall (Zihl, 2002), also ein Ausfall desjenigen Bereiches, der ohne Augen-, Kopf- und Körperbewegung gleichzeitig gesehen werden kann. Bei Ausfall oder Einschränkung dieses Feldes stehen Beeinträchtigungen der visuellen Exploration meist im Vordergrund: Der Patient wird im betroffenen Gesichtsfeld keine Gegenstände mehr wahrnehmen können und deswegen an Hindernisse anstoßen. Klinisch ist er in diesem Feld blind.

1.1 Typologie von Gesichtsfeldausfällen

Als Ursache für Gesichtsfeldausfälle werden zu 70% Hirninfarkte angegeben. Mit großem prozentualem Abstand folgen Hirntumoren, neurochirurgische Eingriffe und traumatische Verletzungen. Wenn der Ort der Schädigung *vor* der Sehbahnkreuzung, d.h. in der Netzhaut oder dem Nervus opticus liegt, entstehen monokuläre Ausfälle: Die Folge ist, dass die visuelle Information des betroffenen Auges keine Information mehr weiterleiten kann. Wenn der Ort der Schädigung *in* der Kreuzung liegt, entstehen Gesichtsfeldeinbußen, die nicht mehr wie bei monokulären Ausfällen auf einem Auge beschränkt bleiben, sondern die Informationsweiterleitung *beider* Sehorgane betreffen: Entweder sind die temporalen oder nasalen Felder beider Augen betroffen (heteronymer Ausfall). Häufig ist die Schädigung jedoch *hinter* der Sehbahnkreuzung, wodurch ein ebenfalls beidäugiger, aber in diesem Falle gleichsinniger (homonymer) Gesichtsfeldausfall entsteht. Gesichtsfeldausfälle sind von Patient zu Patient verschieden: Sie unterscheiden sich in der Dichte, Lage und Größe. Wenn eine hohe Dichte vorliegt, ist der Ausfall *absolut*, d.h. es liegt ein völliges Fehlen von Seheindrücken vor (Anopie oder Anopsie). Wenn die Dichte niedrig ist, ist das Sehvermögen innerhalb des betroffenen Feldes zwar eingeschränkt, aber nicht ausgefallen; wir sprechen dann von einem *relativen* Gesichtsfeldausfall, bei dem eine mehr oder weniger stark eingeschränkte Wahrnehmungsfähigkeit (Amblyopie) beschrieben wird. Die Lage und Größe des Ausfalls entsprechen der Topografie der Gesichtsfeldabbildung im primären visuellen Kortex (striärer Kortex, V1), wobei monokuläre Gesichtsfeldgrenzen, die nach einer Schädigung des *hinteren* Anteils der Sehstrahlung bzw. des striären Kortex entstehen, stärker mit der Lokalisation der Schädigung im visuellen System korrespondieren als Läsionen im *vorderen* Anteil des Systems (Tractus opticus, CGL, vorderer Anteil der Sehstrahlung);

letztere hinterlassen tendenziell eher inkomplette, oft sektorenförmige und/oder unregelmäßige Gesichtsfeldeinbußen.

Ein Gesichtsfeldausfall liegt i.d.R. *unilateral* vor (Verhältnis uni- zu bilateral: 9 zu 1), wobei in ca. 65% aller Gesichtsfeldausfälle eine *homonyme Hemianopie* (Abb. 1a), in ca. 16% eine *Quandrantenanopie (*Abb. 1b*)*, in ca. 8% ein *parazentrales Skotom* (Abb. 1c) und in ca. 11% eine *Hemiamblyopie* vorliegt (Abb. 1d; grau-schwarze Fläche symbolisiert einen Ausfall mit geringer Dichte).[2]

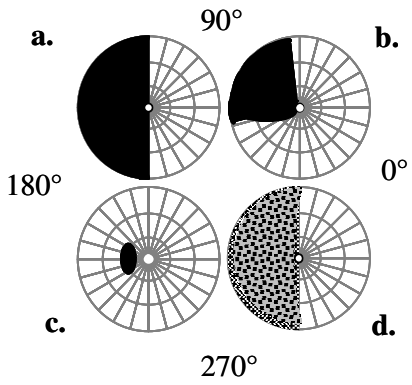


Abb.1 a-d: *Linksseitige Gesichtsfeldausfälle dargestellt für die zentralen 60° Sehwinkel, wobei jeder innerer Kreis 10° darstellt; siehe Text.*

1.2 Behandlung von Gesichtsfeldausfällen und deren Prognose

Allgemein ist von Gehirnläsionen im somatosensorischen oder motorischen System bekannt, dass deren Ausfälle sich häufig spontan zurückbilden (Stoerig, 2000). Bei Läsionen im visuellen System hingegen ist die Spontanremissions-Rate niedriger: In nur 20% werden Remissionen beobachtet, die meist in den ersten sechs Monaten nach dem Läsionsdatum beschrieben werden. Den übrigen 80% der betroffenen Patienten bleibt die Frage nach einem effektiven Weg zur Wiederherstellung des Gesichtsfeldes bislang noch unzureichend beantwortet. Dabei ist im individuellen Fall oft nicht einmal geklärt, ob visuelle Reize, die ins blinde Feld fallen überhaupt vom Nervensystem verarbeitet werden. Die Antwort hat weit reichende Implikationen und stellt eine entscheidende Weichenstellung in der Behandlung des Patienten dar: Wenn unbewusste visuelle Verarbeitungsprozesse negiert werden bzw. für die Behandlung keine relevante Rolle spielen, bleibt der Gesichtsfeldausfall mehr oder weniger sich selbst überlassen. Die Therapie besteht im Wesentlichen darin, dem Patienten eine soziale und emotionale Unterstützung zu geben, mit der Gesichtsfeldeinbuße besser leben zu können, und zum andern ein „Training“ anzubieten, kompensatorische Augen- und Kopfbewegungen in das betroffene Gesichtsfeld regelmäßig durchzuführen, was einer strategischen Unterstützung entspricht.

[2] Prozentangaben beruhen auf 714 Patienten; (Zihl, 2000)

Anders verläuft die Therapie, wenn visuelle Restfunktionen – auch wenn sie unbewusst sind - als „Ressource“ und Ausgangsbasis für die Therapie verstanden werden: Bei diesem Ansatz trainiert und lernt der Patient, seine Aufmerksamkeit (nicht den Blick) auf das blinde Feld zu richten. Dieses Vorgehen erscheint dem Blinden zunächst widersinnig, weil dieser Teil seines Gesichtsfeldes nicht mehr abgebildet ist. Studien an Affen (z.B. Weiskrantz & Cowey, 1970) kommen allerdings zu dem Resultat, dass diese gerichtete Aufmerksamkeitsverschiebung in das blinde Feld hinein vermutlich eine notwendige Bedingung ist, um die Ressourcen bzw. visuellen Restfunktionen zu erhalten und auszubauen. Das Ziel dieses therapeutischen Ansatzes ist es, eine zumindest teilweise Restitution des Gesichtsfeldes zu erreichen. Wie ein solches Trainingsprogramm aussehen kann, wird von STOERIG (2000) erläutert. In jedem Falle wird bei diesen Verfahren davon ausgegangen, dass Informationen ungesehener visueller Reizmerkmale tatsächlich in das visuelle System eintreten. Für diese These gibt es zwar zahlreiche empirische Belege, Studien, auf die ich noch zu sprechen komme, aber ebenso auch Untersuchungen, die auf inter- und intraindividuelle Varianzen hinweisen: Zum einen ist nicht bei jedem Patienten mit postgenikulären Läsionen[3] eine solche implizite Informationsverarbeitung von optischen Reizen im blinden Feld nachweisbar und zum anderen wird nicht selten berichtet, dass ein und derselbe Patient an *einem* Untersuchungstag signifikante Leistungen zum Beispiel in der Entdeckung von visuellen Reizen erbracht hat und an einem *anderen* Tag bei derselben Aufgabe nicht. Die Ursachen dieser Varianzen sind bislang unbekannt: Eine nahe liegende Frage muss jedoch gestellt werden: Hat das Nervensystem derer, die nie überzufällige Leistungen erbringen bzw. derer, die starke Leistungsschwankungen aufweisen und deren Ergebnisse an diesem speziellen Untersuchungstag auf Zufallsniveau liegen, überhaupt visuelle Informationen aus dem betroffenen Gesichtsfeld erhalten?

Auf diese Frage sind generell zwei Antwortenvarianten denkbar: Erstens, die visuelle Information wird erst gar nicht vom Nervensystem aufgenommen bzw. verarbeitet, so dass auch keine überzufälligen Ergebnisse in psychophysischen Experimenten zu erwarten sind: Die Nullhypothese, dass die klinische Blindheit auch eine totale Blindheit ist, wäre in diesem Falle richtig. Zweitens, die Information wird sehr wohl im Nervensystem verarbeitet, ist aber zu schwach, vielleicht von anderen Informationsprozessen überlagert oder mit zu wenig Aufmerksamkeit versehen, so dass die Ergebnisse letzten Endes inkonsistent sind oder keinen Nachweis zur Informationsverarbeitung erbringen. Hierzu zählt auch die Möglichkeit, dass die zur Verfügung stehenden Messinstrumente nicht sensitiv genug sind, um die neuronale

[3] Postgenikuläre Läsionen sind solche, die die primäre Sehbahn betreffen und hinter dem seitlichen Kniehöcker des Thalamus (CGL) lokalisiert sind.

Aktivität zu erfassen (z.B. durch technische Unzulänglichkeiten). Es handelte sich in diesem Falle also um einen Irrtum (Fehler 2. Art), bei dem die Alternativ-Hypothese (visuelle Funktionen sind trotz klinischer Blindheit erhalten) zu Unrecht zurückgewiesen werden würde. Dass die o.g. Frage noch nicht beantwortet ist, machen auch die breit gestreuten Angaben zur Prävalenz von visuellen Restfunktionen deutlich: Während am unteren Ende MARZI und Kollegen (1991) bei nur 5% der Patienten visuelle Restfunktionen ermittelten, gelang am oberen Ende WEISKRANTZ (1980) und STOERIG (1987) bei 63% bzw. 60-80% der Patienten der Nachweis für visuelle Restfunktionen. Von rindenblinden Affen wird sogar berichtet, dass fast alle Blindsehfähigkeiten aufweisen (Stoerig & Cowey, 1997).

Wie ist diese Diskrepanz zu erklären? Generell stellt sich bei der Erfassung des Blindseh-Prävalenz das Problem, dass neben den häufig vorliegenden psycho*physischen* insbesondere -*physiologische* Datensätze fehlen, denn vor allem letztere machen eine differenziertere Analyse unbewusst verlaufender Prozesse erst möglich. An dieser Stelle stehen Blindseh-Forscher vor einem Dilemma: Methoden, die (vermutlich) eine hohe Sensitivität haben wie beispielsweise elektrophysiologische (EEG) oder bildgebende Verfahren (fMRT bzw. PET), könnten auf der einen Seite eine psychophysiologische Datenbasis schaffen, sind jedoch andererseits oft zu personal- und kostenaufwändig. Diese Aufwandskosten machen die kontinuierliche Daten- und Befunderhebung nicht nur technisch, organisatorisch und finanziell schwierig, sie werden auch vom Patienten aufgrund von Unannehmlichkeiten (z.B. Elektrodenkleben, lange Liegezeiten im engen Scanner etc.) nur bedingt toleriert. Deswegen wird in Trainingseinheiten, in denen oft Messungen zur Blindsehfähigkeit vorgenommen werden, oft auf deren Einsatz verzichtet, so dass lediglich die Verhaltensdaten, d.h. die Psychophysik als Diagnostikum zur Verfügung steht. Mit den psychophysischen Daten allein läuft der Untersucher bei nicht-signifikanten Ergebnissen jedoch Gefahr, das Blindseh-„Potenzial“ zu übersehen. Darum ist der Einsatz einer ökonomischen und für den Patienten wenig belastenden psychophysiologischen Methode sehr sinnvoll. Die Pupillometrie könnte diesen Anforderungen genügen.

1.3 Ziel der Arbeit

Die vorliegende Arbeit hat zunächst das Ziel, die Pupillometrie in ihrer Sensitivität zum Nachweis impliziter Informationsverarbeitungsprozesse zu untersuchen. Dazu werden mögliche Einflussfaktoren untersucht, die bei unbewussten Prozessen während der visuellen Reizdarbietung eine Rolle spielen könnten: die Experimente A1 und A2 (bestehend aus drei

Teilen) untersuchen das psychophysische und pupillometrische Verhalten bei sehgeschädigten, die Experimente B1 und B2 bei normalsichtigen Probanden.
Die Pupillometrie wird dabei stets als psychophysiologische Methode in den experimentell-psychophysischen Kontext eingebettet und soll klären, in wie weit psychophysische und –physiologische Daten korrespondieren.

1.4 Begriffliches

Bevor ich nun auf die Thematik des unbewussten Sehens detaillierter eingehe, möchte ich die Begriffe Wahrnehmung von Empfindung sowie Bewusstsein von Bewusstheit vorab mit einer Arbeitsdefinition versehen:
In der vorliegenden Arbeit impliziert der Terminus *Wahrnehmung* die mentale Repräsentation eines Gegenstandes. Diese Repräsentation zeichnet sich durch die bewusste Abbildung eines äußeren Reizes aus. Es wird hierbei auch von einem Perzept gesprochen, das erlebt und erfahren wird. Von dem Perzept abzugrenzen ist die sensorische Empfindung: Sie ist der Wahrnehmung (Perzeption) vorgeschaltet und beginnt mit der Umwandlung physikalischer bzw. chemischer Energie („Sprache“ der Umwelt) in neuronal codierte Aktivität („Sprache“ des Körpers). Diese von Rezeptorzellen umgeformte Information (Transduktion) wird in Form von Aktionspotenzialen an das Zentralnervensystem weitergeleitet, in dem die Empfindung (engl. *sensation*) niedergelegt wird. Hier endet der Prozess der Empfindung. Erst wenn diese Empfindung tatsächlich bewusst wird, kann von Wahrnehmung, also einer Perzeption gesprochen werden.
Im Weiteren werden die Begriffspaare unbewusst-bewusst, explizit-implizit, unterschwellig-überschwellig und subliminal-supraliminal äquivalent verwendet. Diese Begriffspaare lassen nolens volens den Eindruck entstehen, dass eine diskrete Schwelle zwischen bewusster und unbewusster Informationsverarbeitung vorliegt. Diese Annahme ist aus methodischen Gründen fragwürdig: Zum einen können Faktoren wie Vigilanz, Interesse, Soziale Erwünschtheit, Anreiz, Tageszeit etc. die Validität und Reliabilität der experimentellen Schwellenwertbestimmung individuell beeinflussen. Zum anderen kann selbst bei einer individuellen vorherigen Schwellenwertbestimmung nicht ausgeschlossen werden, dass die Versuchsperson (Vp) ihr Antwortkriterium innerhalb eines experimentellen Durchgangs verschiebt. Schließlich treten Übungs- und Lerneffekte bei jeder Vp auf, so dass die Reizdarbietungszeit fortlaufend anzupassen ist: Unklar wäre jedoch, wie schnell die jeweilige Vp diese Lern- und Übungseffekte entwickelt, was eine adaptive Anpassung der Reizdarbietungszeit sehr aufwändig machte. In Ermangelung der Beweislage, dass als

„unterschwellig“ deklarierte Reize auch wirklich unterschwellig sind und somit vom Probanden nicht wahrgenommen wurden, erscheint es sinnvoller, diese Reize in einen *schwellennahen* Bereich anzusiedeln. Denen gegenüber stehen dann Reize, die deutlich überschwellig sind und vom Probanden mit großer Sicherheit erkannt bzw. klassifiziert werden. Der Unterschied dieser beiden Reizklassen ist in phänomenaler Hinsicht eher ein qualitativer (Reiz wird wahrgenommen oder eben nicht bzw. kaum wahrgenommen), in neurowissenschaftlicher Hinsicht eher ein quantitativer, wobei unterschwelligen bzw. schwellennahen Reizen eine nur *geringe*, überschwelligen hingegen eine deutlich *höhere* Verarbeitungstiefe zugeschrieben werden kann.

Schließlich müssen noch die Begriffe Bewusstsein (engl. *consciousness*) und Bewusstheit (engl. *awareness*) voneinander abgegrenzt werden: Während ersterer auch im unwissenschaftlichen Bereich weite Verwendung findet und ganz allgemein als die Summe aller gegenwärtigen inneren Repräsentationen, die den Zustand des Individuums kennzeichnen, verstanden wird, beschreibt letzterer relativ eng umgrenzt die Prozesse innerer Gewahrwerdung eines Reizes und kann darüber hinaus auf eine Modalität, etwa die visuelle Bewusstheit eingegrenzt werden (engl. *visual awareness*). Bewusstheit zielt also auf die Gewahrwerdung spezifischer Reizaspekte ab, und diese zur Disposition stehende Gewahrwerdung ist zukünftig gemeint, wenn die Begriffe bewusst bzw. unbewusst einschließlich deren o.g. Äquivalente gewählt werden.

Umschreiben wir nun den inhaltlichen Schwerpunkt, der diese Studie ausmacht. Im Zentrum steht dabei das Phänomen des Blindsehens. Dieser Terminus stellt für sich genommen ein Paradoxon dar, das im Folgenden erläutert wird.

2.0 Blindsehen: Was ist das?

Blindsehen bezeichnet die implizite Verarbeitung visueller, nicht bewusst repräsentierter Stimuli. Die Verarbeitung dieser Reize ist bei manchen Patienten mit Gesichtsfeldausfällen experimentell nachweisbar (sog. Blindseher), bei manchen aber auch nicht. Meist ist der Gesichtsfeldausfall durch eine Läsion verursacht, die die primäre Sehrinde zerstört oder denerviert hat, weswegen auch von Rindenblindheit oder kortikaler Blindheit gesprochen wird. Obwohl die visuelle Bewusstheit für das betroffene Gesichtsfeld nicht mehr vorliegt, können visuelle Funktionen auf ungesehene Reize verschont bleiben, so dass eine Dissoziation zwischen visueller Bewusstheit und Performanz vorliegt. Im Lichte dieser Dissoziation lässt sich nun der Terminus Blindsehen erklären: Der erste Teil des Wortes, nämlich „Blind“, bezieht sich auf das phänomenale Erleben des Patienten, d.h. die klinische

Blindheit. Der zweite Teil, also „Sehen“, macht deutlich, dass visuelle Restfunktionen trotz fehlender Bewusstheit erhalten geblieben sind. Man spricht in diesem Zusammenhang auch vom Residualsehen, wobei dieser Terminus Sehleistungen subsummiert, die bewusst oder unbewusst ablaufen können. Blindsehen hingegen ist definitionsbedingt immer unbewusst.

2.1 Historie des Blindsehens

Lange Zeit wurde davon ausgegangen, dass eine durch eine Denervierung oder Zerstörung des primären visuellen Kortex verursachte *klinische* Blindheit auch eine *totale* Blindheit ist. Diese Annahme wurde jedoch in Frage gestellt, nachdem RIDDOCH (1917) und HOLMES (1918) feststellten, dass Menschen mit okzipitalen Läsionen hochkontrastige und bewegte oder flackernde visuelle Reize im blinden Feld bemerkten. Andere Reize hingegen, die zum Beispiel durch Farbe oder Form, jedoch nicht durch Bewegung und hohem Kontrast charakterisiert waren, wurden nicht bemerkt. Dieses Phänomen („statokinetische Dissoziation“) nährte Zweifel daran, ob eine Läsion in der primären Sehrinde *unter allen Umständen* zu einem totalen Verlust visueller Funktionen führen muss.
Es stellte sich die Frage, ab wann ein Ausfall *absolut* ist: WILBRAND und SÄNGER (1904) schlugen diesbezüglich vor, dass ein absoluter Gesichtsfeldausfall vorliegt, wenn...

> *„alle und jegliche Empfindungsqualität, also Helligkeit und Farbwahrnehmung, ausgefallen ist und absolut hier nicht mehr empfunden wird“.*

Bemerkenswert an dieser 100-jährigen Definition ist, dass WILBRAND und SÄNGER als Kriterium für die Absolutheit die *visuelle Wahrnehmung* per se hervorgehoben haben und nicht den Ausfall von visuellen Funktionen. Sollten denn tatsächlich visuelle Funktionen erhalten geblieben sein? Diese spannende Frage wurde nun auf zweierlei Arten zu beantworten versucht:
Zum einen zeichneten Forscher den Pupillenlichtreflex und den optokinetischen Reflex von ungesehenen Stimuli auf, also Reaktionen, von denen man wusste, dass sie – auch bei normalsichtigen Probanden - ohne visuelle Bewusstheit ablaufen. Zum anderen wurden betroffene Patienten (immer wieder) befragt, ob - und wenn ja in welchem Ausmaß - sie farb-, form- oder bewegungsspezifische Reizmerkmale in einem experimentellen Setting bemerkt haben (z.B. Bender und Krieger, 1951; Brindley et al., 1969).
Parallel zu diesen beiden Ansätzen führten Arbeitsgruppen wie die von KLÜVER (1936, 1949), PASIK UND PASIK (1965) sowie WEISKRANTZ und COWEY (1970) tierexperimentelle Studien durch: Nachdem sie den primären visuellen Kortex von Affen chirurgisch entfernt

hatten und so vermutlich[4] *absolute* Gesichtsfeldausfälle im entsprechenden kontralateralen Gesichtsfeld verursacht hatten, präsentierten sie auch hier visuelle Stimuli im blinden Feld.
Da sich die experimentellen Fragestellungen allein mit reflexiven Antworten (1. Ansatz) nicht beantworten ließen und darüber hinaus die Affen auch nicht direkt befragt werden konnten, ob und in welchem Grad bei der Stimulus-Exposition visuelle Bewusstheit vorgelegen hatte (2. Ansatz), wendeten sie sog. *direkte* Verfahren an: Zu ihnen zählen erzwungene Rateprozeduren, die auch „Forced-Choice"-Verfahren genannt werden. Diese verlangten dem Versuchstier eine Entscheidung ab, *ob* innerhalb ihres blinden Feldes ein Reiz dargeboten worden war („ja" oder „nein"), *wo* er dargeboten war (z.B. „oben" oder „unten") und/oder welcher Reiz es am ehesten gewesen sein mag (z.B. „Kreis" oder „Quadrat"). Bei Forced-Choice-Verfahren werden immer nur vordefinierte Antworten zur Verfügung gestellt, aus denen das Versuchstier auswählen kann; in den o. g. Fällen sind es je zwei, weswegen dieser Aufgabentyp auch Zwei-Wahl-Rate-Aufgabe oder two-alternative forced choice Verfahren, 2-AFC, genannt wird. Wenn das Versuchstier nun auf einen visuellen ungesehenen Reiz, der i.d.R. zur zeitlichen Orientierung von Hinweisreizen flankiert ist, keine Antwort gibt, wird dies als eine falsche Antwort gewertet und somit nicht belohnt (z.B. mit einem favorisierten Nahrungsmittel). Wenn das Versuchstier jedoch mit einem Tastendruck reagiert und dazu *richtig* geantwortet hat, erhält es eine solche Belohnung. Diese Belohnung ermutigt das Tier in zukünftigen Trials, nicht nur zu antworten, sondern das „richtige" Verhalten zu erlernen. Inwieweit das Tier diese Aufgabe erlernen kann, hängt maßgeblich davon ab, ob im blinden Feld in irgendeiner Form eine Reizaufnahme bzw. -verarbeitung stattfindet. Dass eine solche Reizaufnahme stattfindet, zeigen zumindest die Ergebnisse aus tierexperimentellen Studien (Überblick in Stoerig & Cowey, 1997). Darum wurden diese an Affen erprobten direkten Untersuchungsmethoden nun auf Experimente mit menschlichen Probanden übertragen.

2.1.1 Blindsehbefunde beim Menschen

Im Jahre 1973 berichtete der Münchener Psychologe ERNST PÖPPEL von überzufälligen Blickbewegungen auf ungesehene Targets, obwohl die vier untersuchten Patienten beteuerten, keinerlei Seheindruck gehabt zu haben. Und ein Jahr später publizierten LAWRENCE WEISKRANTZ und Kollegen (1974) die Ergebnisse des Patienten DB, der aufgrund einer arterio-venösen Missbildung u.a. den rechtshemisphärisch gelegenen striären Kortex

[4] Von menschlichen Primaten ist bekannt, dass eine solche Läsion zu einem absoluten Ausfall führt, bei tierischen kann es nur vermutet werden, da ihr phänomenales Sehen möglicherweise anders im visuellen System entsteht; siehe Cowey & Stoerig, 1995.

chirurgisch entfernt bekommen hatte. Besonderes interessant sind die Ergebnisse deswegen, weil in diesen Experimenten *statische* Reizmerkmale wie zum Beispiel X vs. O oder horizontale vs. vertikale Linien überzufällig diskriminiert werden konnten. Auch vermochte D.B. mit erstaunlicher Genauigkeit nach visuellen Reizen im blinden Feld zu greifen und isoluminante rote und grüne Punkte zu diskriminieren. Diese Ergebnisse hatten nun eine andere Qualität als die von RIDDOCH und HOLMES (s.o.), da sich die Verarbeitung nicht nur auf bewegte, sondern nun auf stationäre Reize bezog. Bemerkenswert sind diese Ergebnisse zudem, weil der Patient selber überrascht war, als er von seinen überzufälligen Ergebnissen erfuhr (*absoluter* Ausfall). WEISKRANTZ gab diesem Phänomen den Namen „Blindsight", wobei er nach zahlreichen weiteren Studien mit anderen rindenblinden Patienten zwischen einem sog. Typ 1 (absoluter Ausfall) und einem Typ 2 (relativer Ausfall) unterscheidet. Diese Unterteilung wird nicht von allen Blindseh-Forschern begrüßt, da sie eine Aufweichung der bereits aufgestellten Kriterien beinhaltet. Welche Ebenen von Blindsehfunktionen nun zu unterscheiden sind, wird im folgenden Punkt näher beleuchtet.

2.2 Ebenen von Blindsehfunktionen

Blindsehen lässt sich auf verschiedenen Ebenen darstellen, wobei die nachweisbaren Residualfunktionen, die diesem Phänomen zugrunde liegen, in vier Gruppen kategorisiert werden können.

2.2.1 Neuroendokrine Antworten

Die niedrigste Ebene der visuellen Verarbeitung findet auf endokrinologischer Ebene statt: CZEISLER und Kollegen (1995) konnten bei sog. „Augen-Blinden", also Patienten mit einer krankhaften Netzhautveränderung, eine Melatonin[5]-Suppression in Abhängigkeit von hellem Licht festmachen.

2.2.2 Reflexive Antworten

Die zweitniedrigste Ebene der visuellen Verarbeitung stellen Reflexe dar: Zu nennen wären hier der optokinetische Reflex, dessen Resultate unklar sind und deswegen kontrovers diskutiert werden (vgl. Verhagen et al., 1996) und der Pupillenlichtreflex, dessen Ergebnisse – besondern mit Blick auf hemianope Patienten - ebenfalls Anlass zur Diskussion gegeben

[5] Melatonin ist ein Hormon, das im Dienste des retinohypothalamischen Systems die zircadiane Rhythmik mitsteuert: Eine Suppression tritt in heller, eine Freisetzung in dunkler Umgebung ein (Zilles & Rehkämper, 1994, S.206).

haben. Da die hier vorliegende Studie die Sensitivität der Pupillometrie zum Untersuchungsgegenstand hat, möchte ich nun auf diesen Punkt genauer eingehen: Im Jahre 1883 vertrat der deutsche Neurologe CARL WERNICKE die Auffassung, dass nur Tractus-opticus-Läsionen zu Pupillenreaktionsstörungen im blinden Halbfeld führen könnten, nicht aber retrogenikuläre Läsionen (Wernicke, 1883; zit. in Wilhelm, 1991). Einige Arbeiten untermauerten WERNICKES Hypothese empirisch (Magoun & Ranson, 1935; Bender & Krieger, 1951; Brindley et al., 1969), so dass Pupillenreaktionen auf Lichtreize - auch in Abwesenheit visueller Bewusstheit – fest in der Ophthalmologie verankert schienen. Die Befürworter führten darüber hinaus anatomische Studien ins Feld, die plausibel darlegten, dass der Pupillenschaltkreis in der Tat ein von anderen visuellen Schaltkreisen losgelöster Kreislauf sei und schlussfolgerten daraus, dass er auch in funktioneller Hinsicht unabhängig sei. Doch einige Forscher stellten diese funktionelle Unabhängigkeit des Pupillenschaltkreises in Frage: So belegten drei Arbeitsgruppen unabhängig voneinander keine oder zumindest gestörte Pupillenreaktionen bei rindenblinden Patienten, obwohl diese in ihrem blinden Gesichtsfeld mit Lichtreizen stimuliert wurden (Frydrychowicz & Harms, 1940; Harms, 1951; Cibis et al., 1975; Alexandridis et al., 1979). Die Unabhängigkeit des Pupillenlichtreflexes geriet ins Wanken und bis heute sind die Befunde kontrovers: JOHN BARBUR (2004) kommt in seinem Übersichtsartikel zum Pupillenlichtreflex bei Hemianopie zu dem Resümee, dass

> *... pupil responses in the blind hemifield are either absent or reduced in amplitude for stimuli of small size and luminance contrast. When large light flux increments are involved, the pupil responds well to both blind and sighted hemifield stimulation.*

BARBUR schlussfolgert daraus, dass es vermutlich mehr als eine afferente Nervenbahn gibt, die den Pupillenlichtreflex zu steuern vermag. Er schlägt deswegen vor, dass

> *… the processing of signals along the geniculostriate pathway is normally required to generate a normal PLR (pupil light reflex) response.*

Die Frage, in welcher Weise subkortikale oder kortikale Strukturen auf Pupillen steuernde Efferenzen Einfluss nehmen, ist noch unbeantwortet. Wenngleich die anatomische Basis für selbstständig agierende Schaltkreise möglicherweise vorhanden ist (z.B. beim Pupillenlichtreflex nach postgenikulären Läsionen), können in funktioneller Hinsicht nachgeschaltete und höhere visuelle Areale (wie z.B. V1, V2, V3, V5) potenziell selbst an basalen Funktionen wie dem Pupillenlichtreflex beteiligt bleiben (siehe Punkt 3.2.4).

2.2.3 Indirekte Untersuchungsverfahren

Indirekte Untersuchungsverfahren gehen der Frage nach, ob Reaktionen auf Reize im *gesunden* Gesichtsfeld durch Reize im *blinden* Gesichtsfeld beeinflussbar sind. Hierzu zählen Priming-Verfahren (z.B. Marzi et al., 1986) und perzeptuelle Vervollständigungen (z.B. Torjussen, 1976).

2.2.4 Direkte Verfahren

Wie schon unter Punkt 2.1 angesprochen, wird in direkten Verfahren nicht gefragt, *ob* etwas wahrgenommen wurde (die Antwort sollte nein lauten, wenn ein absoluter Gesichtsfeldausfall vorliegt), sondern welche vorgegebene Antwort am *ehesten* zutrifft. Durch diese Form von Rateprozedur konnte gezeigt werden, dass einige Patienten (sog. Blindseher) überzufällig Reize entdecken, lokalisieren oder diskriminieren konnten, wobei Reizmerkmale wie Leuchtdichte, Größe, Orientierung, Wellenlänge, Form, Bewegung oder Bewegungsrichtung untersucht wurden (Übersichten in Stoerig & Cowey, 1997, Weiskrantz, 1999, 2004, Cowey, 2004).

2.3 Funktionelle Neuroanatomie des Blindsehens

Im Zentrum dieses Kapitels steht die Erörterung zweier Fragen: Wie werden residuale Sehfunktionen neuronal vermittelt und was passiert auf neuronaler Ebene, wenn nach einer Läsion der primären Sehrinde die rezeptiven Neurone die Information vorgeschalteter Strukturen nicht mehr empfangen können.

2.3.1 Wie wird Blindsehen neuronal vermittelt?

Das meiste, was heute zur neuronalen Grundlage des Blindsehens bekannt ist, stammt von tierexperimentellen Studien. Insbesondere Studien an Affen, denen der primäre visuelle Kortex chirurgisch entfernt worden war, legten eine Reihe von neuronalen Pfaden offen, die auch bei Zerstörung der primären Sehrinde für die Vermittlung von visuellen Seheindrücken verantwortlich sein können. Normalerweise enthält der Pfad zum Thalamus (Abb.2), insbesondere der zum Corpus geniculatum laterale (CGL) die meisten aller retinalen Ganglienzellen (ca. 90%), die in der Mehrzahl an die primäre Sehrinde weitergeleitet werden. Vermutlich ist dieser Pfad sehr wichtig für die visuelle Bewusstheit (vgl. Stoerig, 2001). Darüber hinaus konnten YUKIE und IWAI (1981) sowie COWEY und STOERIG (1989) aufzeigen, dass ein kleiner Teil der CGL-Axone *direkt* in sekundäre oder tertiäre visuelle

Areale projiziert. Bei postgenikulärer Läsion könnte demnach die visuelle Information über diese Axone in extrastriäre Areale projiziert werden, deren Aktivität schließlich für visuelle Restfunktion verantwortlich sein könnten.

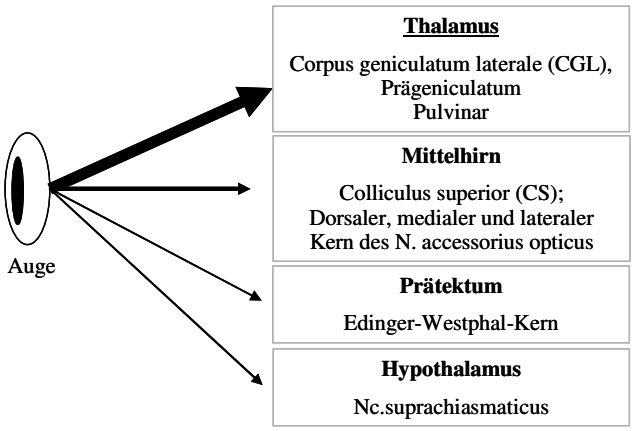


Abb.2: *Ganglienzellaxone ziehen von der Retina zu retinorezipienten Kernen; die Pfeildicke deutet die Stärke der Projektionen an.*

Ein zweiter Pfad, der für visuelle Restleistungen diskutiert wird, verläuft unter Umgehung des CGL's über die Colliculi superiores (CS), die die Information ihrerseits zum Pulvinar und in der Folge zu sekundären und tertiären visuellen Arealen weiterleiten (Retino-colliculo-pulvinar-kortikales System). Da diese neuronale Bahn auch eine - zumindest grobe - Analyse der visuellen Informationen vornehmen kann und bei Amphibien und Reptilien die eigentliche Sehbahn darstellt (Kolb & Wishaw, 1996), vermuten viele Blindseh-Forscher, dass auch dieser Pfad prinzipiell für eine grobe Analyse herangezogen werden kann (z.B. für die Erkennung von Umrissen und Kontrasten). Experimente an rindenblinden Affen, die Lokalisationsleistungen trainiert und konsistent gezeigt hatten, verloren diese Fähigkeiten, nachdem man zusätzlich ihre CS chirurgisch lädierte (Mohler & Wurtz, 1977; Pasik & Pasik, 1965, 1982; Rodman et al., 1990). Ein weiterer Befund, der die Aktivität dieses Pfades herausstellt, wird von bildgebenden Studien berichtet, die ebenfalls von einem vermehrten Stoffwechsel der CS bei visueller Stimulation im blinden Halbfeld berichteten (z.B. Morris et al., 2001).

STOERIG und COWEY (1997) beschreiben in ihrem schon mehrfach angeführten Übersichtsartikel sieben weitere neuronale Kerngebiete, die zusammenfassend betrachtet drei weiteren Subsystemen zuzuordnen sind: das retinoprätektale, das retinohypothalamische und das akzessorische optische System.

Das retinoprätektale System vermittelt Pupillen- und Akkommodationsreflexe. Zu ihm zählen insbesondere der Nucleus accessorius nervi oculomotorii (Edinger-Westphal-Kern) und der Nucleus tractus optici. Diesem System werden wir uns später noch genauer zuwenden.

Das retinohypothalamische System steuert die zirkadiane Rhythmik; maßgeblich beteiligt sind sukzessive der Nucleus suprachiasmaticus, Nucleus paraventricularis des Hypothalamus, der Nucleus intermediolaterales und schließlich das Ganglion cervicale superius, das letzten

Endes die Epiphyse (Corpus pineale) zu einer physiologischen Melatoninfreisetzung veranlasst.

Schließlich bleibt noch das akzessorische System zu erwähnen, zu dem der Nucleus accessorius opticus mit seinem dorsalen, medialen und lateralen Kern zählt. Diesem Kern wird als Hauptaufgabe die Steuerung des optokinetischen Nystagmus zugeschrieben (Zilles & Rehkämper, 1994, S. 207). Die PASIKS (1965) jedoch fanden bei Affen, deren striärer Kortex entfernt worden war, erhebliche Störungen in der Blindsehleistung, wenn ihnen zusätzlich das laterale Prätektum einschließlich des Nc. Accessorius opticus (vermutlich mit seinen drei Kernen) lädiert wurde. Dieser Befund lässt mit Blick auf Blindsehfunktionen durchaus eine Option für die Beteiligung des Nc. accessorius opticus samt seiner drei Kerne offen.

Insgesamt gesehen zeigen Studien an anästhesierten Affen, deren striärer Kortex entfernt oder reversibel inaktiviert wurde, dass der sog. *dorsale* visuelle Informationsstrom (vgl. Ungerleider & Mishkin, 1982) mehr von seiner Antwortbereitschaft behält als der *ventrale* Strom[6] (vgl. Übersichtsartikel von Bullier et al., 1994). Dies passt zu der Beobachtung der statokinetischen Dissoziation, die auch in der heutigen Blindsight-Forschung öfters beschrieben wird: Bewegte (und kontrastreiche) Reize werden tendenziell eher erkannt als stationäre (Stoerig & Cowey, 1997, Weiskrantz, 1999).

2.3.2 Welche anatomischen Konsequenzen hat ein V1-Läsion?

Wenn eine Zerstörung oder Denervierung der primären Sehrinde (V1) eingetreten ist, kommt es zu einer absteigenden (retrograden) Degeneration von Nervenzellen, d.h. innerhalb weniger Monate nimmt die Innervationsdichte der CGL-Projektionsneurone ab (*Cowey et al., 1989*). Darüber hinaus erleiden auch diejenigen retinalen Ganglienzellen eine Schädigung, die diese CGL-Neurone mit Informationen gespeist haben, so dass in diesem Falle von einer *transneuronalen* Degeneration gesprochen werden kann. COWEY und Kollegen (1989) untersuchten diesen retinalen Zellabbau beim Affen und stellten fest, dass bis zu 80% der Ganglienzellen im zentralen Teil der betreffenden Netzhauthälften betroffen waren. Diejenigen Nervenzellen, die überlebten, projizierten ihre Axone zu anderen retinorezipienten Kernen des Mittelhirns und Dienzephalons.

[6] UNGERLEIDER und MISHKIN schlugen 1982 vor, dass vom Okzipitallappen ausgehend zwei große visuelle Verarbeitungsbahnen bestehen: Die dorsale Bahn verläuft von V1 zu den parietalen, die ventrale von V1 zu den temporalen Regionen. Währenddessen sich erstgenannte Bahn der Frage nachgeht, „wo“ ein Gegenstand ist, vermittelt letztgenannte einen Eindruck darüber, „was“ es ist. Obwohl diese These durch eine Vielzahl von anatomischen und Verhaltensbeobachtungen bestätigt wurde, haben MILNER und GOODALE (1993) diese weiter ausbauen und spezifizieren können (vgl. Kolb & Wishaw, 1996, S. 209f).

Eine Abnahme der Innervationsdichte wurde aber nicht nur für das CGL berichtet (van Buren, 1963, Miahailovic et al., 1971), sondern auch für weitere Strukturen wie zum Beispiel den Olivenkern des Prätektum (Dineen et al., 1982).

Mit Blick auf die Ganglienzellklassen konnte ferner eruiert werden, dass ein selektiver Neuronentod der Pß-Zellen eintritt: *Vor* der Läsion beträgt das Verhältnis von Pα, Pß und Pγ[7] Neuronen annähernd 1:8:1 (Perry & Cowey, 1984), *nach* der Läsion in etwa 1:1:1 (Cowey et al., 1989, Weller & Kaas, 1989, Niida et al., 1990). Auf der anderen Seite gehen Strukturen und Pfade, die aufgrund der Läsion nun vermehrt genutzt werden, gestärkt hervor: Dafür spricht der Befund, dass das Prägenikulatum des Thalamus nach einer postgenikulären Läsion vergrößert erscheint (Dineen et al., 1982), wobei noch unklar ist, ob das Prägenikulatum tatsächlich proliferiert oder nur größer erscheint, weil das CGL geschrumpft ist. Interessanterweise zeigen die Projektionsneurone zu den CS (Dineen et al, 1992) und zum Pulvinar (Cowey et al., 1994) nach einer Läsion keine Veränderung, was darauf hinweisen könnte, dass diese Nervenzellen unverändert visuelle Informationen verarbeiten und weiterleiten. Ob diese Projektionsneurone nun proliferierten, wenn Patienten verstärkt Blindsehfunktionen trainierten, ist eine offene Frage.

2.3.3 Welche Funktion hat Blindsehen?

Anhand der Melatonin-Suppression, die CZEISLER und Kollegen (1995) trotz retinaler Pathologie bei einigen Patienten hatten feststellen können, wird deutlich, dass visuelle Subsysteme durchaus ihre ursprüngliche Funktion aufrechterhalten können. Dies braucht nicht zu verwundern, wenn man bedenkt, dass die erwähnten Subsysteme zum Teil schon in der Retina eigene Projektionsneurone unterhalten und bereits vor dem CGL ihre eigenen neuroanatomischen Wege gehen: Tritt nun eine Läsion hinter dem CGL auf, besteht durchaus die Möglichkeit, dass nicht betroffene vorgeschaltete Nervenzellen ihren Aufgaben weiterhin nachkommen. In wie weit visuelle Rest-Funktionen besonders bei rindenblinden Patienten tatsächlich genutzt werden können, ist eine offene Frage. Eine Antwort auf diese Frage lassen die Befunde von HUMPHREY (1974) erahnen, der eine Äffin namens „Helen“ untersuchte: Helen hatte den primären visuellen Kortex beider Hemisphären entfernt bekommen. Trotzdem lernte sie visuelle Objekte zu lokalisieren, entdecken und greifen. Darüber hinaus gelang es

[7] In der Retina gewährleisten verschiedene Ganglienzellklassen funktionelle Spezialisationen: Danach können bei Primaten (P) ihrer Größe nach großzellige Alpha-Zellen (α), die eine geringe Ortsauflösung haben, mittelgroße Beta-Zellen (β) mit hoher Ortsauflösung und kleine Gamma-Zellen (γ), die in der Retina weit gestreut sind und Informationen über Bewegung von Objekten im Sehfeld weiterleiten, unterschieden werden (vgl. Zilles & Rehkämper, 1994, S. 190).

ihr, in einer „test arena“ um aufgestellte Gegenstände herumzulaufen, nicht aber um transparente Scheiben, gegen die sie anstieß. HUMPHREY schloss daraus, dass ihr Verhalten *visuell* gesteuert sein musste. Diese Verhaltenssteuerung konnte nur von anderen visuellen Systemen als dem primären gesteuert sein, da letzteres ja beschädigt war. Aufgrund dieser beeindruckenden Lernleistung vermuten Blindseh-Forscher ein hohes Potenzial, das rindenblinde Patienten oft nicht ausnutzen.

3.0 Anatomie und Physiologie der Pupille

Betrachten wir ein Auge von Außen so fällt neben Strukturen, die den Augapfel umgeben (Augenbrauen, Ober- und Unterlied) zunächst einmal das „Weiße“ im Auge auf. Dabei handelt es sich um die Lederhaut (Sklera), die ihrerseits von der durchsichtigen und deswegen unsichtbaren Bindehaut (Tunica conjunctiva) überzogen ist. Das „Farbige“ im Augapfel ist die Regenbogenhaut (Stroma iridis; Iris), die in ihrer Mitte ein Loch aufweist, die Pupille. Dass die Pupille lediglich ein „Loch“ der Iris ist, rückt das Interesse bei Größenveränderungen der Pupille vollends auf die Struktur, durch deren Veränderung dieses Loch in der Größe variiert wird, namentlich die Iris. Darum wird - nachdem wir uns im schematischen Querschnitt die wesentlichen Strukturen eines Augapfels vergegenwärtigt haben, der Aufbau der Iris im Mittelpunkt stehen.

3.1 Das Auge im Querschnitt

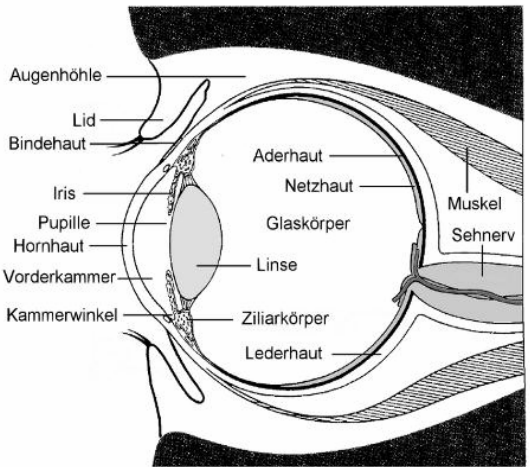


Abb. 3 : *Auge im Querschnitt* (aus www.auge-online.de)

Der Augapfel ist annähernd kugelförmig aufgebaut, dessen Inhalt aus drei hintereinanderliegenden, lichtdurch-lässigen Medien, dem Kammerwasser, der Linse und dem Glaskörper besteht. Die eintreffenden Lichtstrahlen werden zur Bildentstehung im Auge gebrochen und auf der Netzhaut scharf abgebildet. Dazu trägt die Hornhaut den größten Teil der Brechkraft bei, die Linse ermöglicht zusätzlich durch Änderung ihrer Krümmung die Scharfeinstellung auf verschiedene Entfernungen (Akkomodation). Die Iris liegt zwischen Hornhaut und Linse und wird wie die Linse auch vom Ziliarkörper aus

innerviert. Die Pupille schließlich entspricht (in optischer Hinsicht) einer variablen Blende, die Abbildungsfehler verringert und den Lichteinfall reguliert. Abbildung 3 zeigt u.a. die genannten Strukturen im Querschnitt.

3.2 Aufbau und Innervation der Iris

Die Iris ist überwiegend aus einer Schicht zarten Bindegewebes aufgebaut, deren Rückseite von einem schwarz gefärbten Pigmentepithel überzogen ist. Der freie (innere) Rand der Iris umschließt schließlich die Pupille, deren Weite durch glatte Muskelfasern innerhalb der Iris verändert werden kann. Der Schließmuskel der Pupille (M. sphincter pupillae) ist ein ringförmig angeordneter Muskel, währenddessen der Erweiterer der Pupille (M. dilator pupillae) radiär verläuft. Dilator und Sphinkter können nicht als echte Antagonisten bezeichnet werden, da der Dilator zu schwach ist, die Wirkung des Sphinkters aufzuheben (Wilhelm; 1991, S.22). Der Pupillenschaltkreis ist im Wesentlichen dem parasympathischen und sympathischen Nervensystem zuzuordnen (Abb.4) und beginnt mit den Photorezeptoren der Retina. Diese leiten visuelle Informationen aus der Umwelt mithilfe von Pα- und Pγ-Ganglienzellen über den Nervus und später Tractus opticus in die Area pretectalis weiter. Die an Pupillenerweiterungen beteiligte *sympathische* Bahn beginnt im Zwischenhirn (Hypothalamus); sie zieht über das ziliospinale Zentrum des Rückenmarks auf Höhe des 1. Thorakalsegmentes (TH1) über das Ganglion cervicale superius – nun postganglionär und somit adrenerg - direkt zum M. dilatator pupillae, der durch seine radiäre Anordnung die Innenränder der Iris zum Außenrand zieht. Dies hat zur Folge, dass die Pupille weiter wird (Mydriasis).

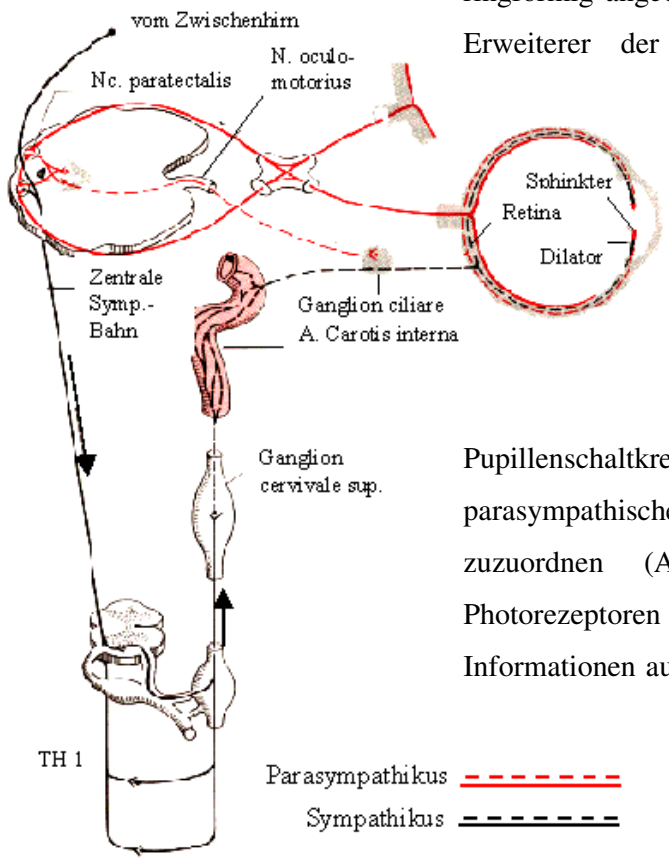


Abb. 4: *Innervation der Irismuskulatur* (aus Duus, 2001)
Erläuterungen siehe Text

Die *parasympathische* Bahn, die in Abbildung 4 als rote Linie dargestellt ist, wird in der kommenden Abbildung 5 noch einmal detaillierter skizziert: Darin erkennen wir, dass die retinoprätektale Bahn (dünne schwarze Linie) unter Umgehung des Corpus geniculatum laterale (CGL, dicke graue Linie) den Nucleus pretectalis erreicht. Von dort aus wird sowohl der ipsi- als auch kontralaterale Edinger-Westphal-Kern (EW) angesteuert, zum Teil über die Commissura epithalamica, die die beiden prätektalen Areale direkt miteinander verbindet. Vom EW, der seinerseits Bestandteil des N. oculomotorius (III. Hirnnerv) ist, zieht eine präganglionäre cholinerge Bahn zum Ganglion ciliare, das in der Folge als postganglionäre Fortsetzung den M. sphincter pupillae kontrahieren lässt. Als Ergebnis beobachten wir eine Pupillenkonstriktion (Miosis).

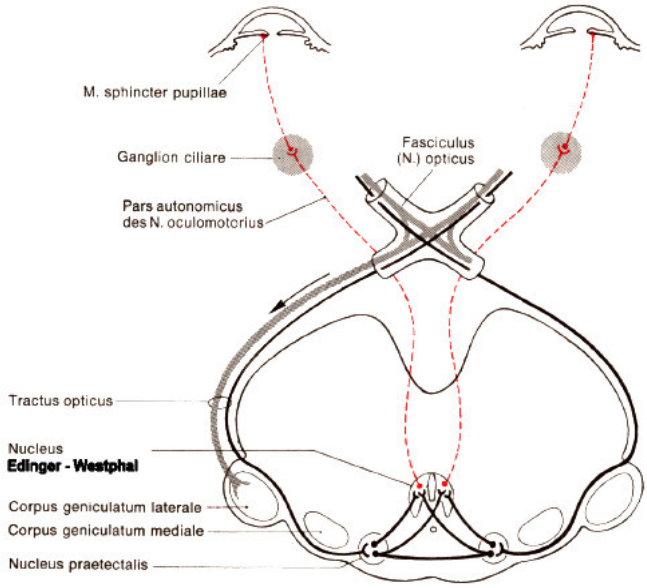


Abb. 5: *Retinoprätektale Bahn mit parasymphathischem Kerngebiet* (aus Duus, 2001)

Betrachten wir die Aktivität des EW isoliert, so finden wir bezüglich der Feuerrate eine Spontanaktivität vor, die im Allgemeinen als hoch beschrieben wird, auch in Abwesenheit externaler Einflüsse (Sillito & Zbrozyna, 1973). Durch diese hohe Feuerrate bedingt findet im Grunde ständig eine Konstriktion der Pupille statt, es sei denn, der EW wird durch andere neuronale Strukturen gehemmt. Welche neuronalen Strukturen sind nun (potenzielle) Inhibitoren des EW? Wenn wir den neuronalen Pfad, der beispielsweise für die Verarbeitung eines Lichtreizes verantwortlich ist, verfolgen, so finden wir nach der retinalen Aufnahme des Reizes (siehe Abb. 6, rechts oben) eine

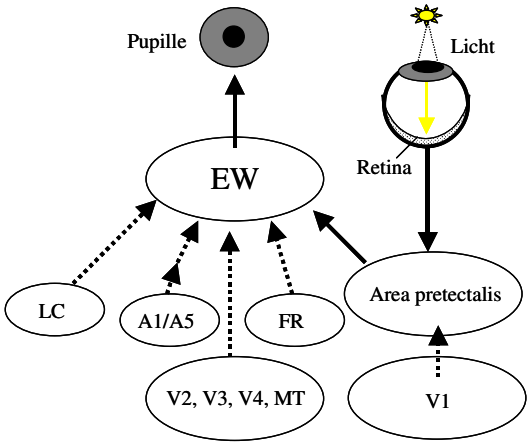


Abb. 6: *Schematische Darstellung von Strukturen, die auf den EW einwirken* (modifiziert, aus Barbur, 2004)

exzitatorische Erregung der Area pretectalis (dargestellt als durchgezogener Pfeil), die ihrerseits den ohnehin schon spontan aktiven EW in seiner Feuerrate beschleunigt. Die Folge ist wie oben dargestellt eine Konstriktion der Pupille. Weitere Strukturen, die den EW *inhibitorisch* beeinflussen (dargestellt mit *gestrichelten* Pfeilen) sind der Nucleus coeruleus (LC, siehe Loewy et al., 1973, Breen et al, 1983; Koss et al., 1984) und die Stammhirnkerne A1/A5, die indirekt über den Hypothalamus (in Abb. 6 als Doppelpfeil angedeutet) den EW erreichen (Loewenfeld, 1958, Koss & Wang, 1972; Szabadi & Bradshaw, 1996).

Große Bedeutung – insbesondere für die hiesige Studie - hat aber auch die Formatio reticularis (FR), die ebenfalls inhibitorisch auf den EW einwirkt und u.a. für Pupillenantworten auf Orientierungsreaktionen oder auf unerwartete Reize verantwortlich gemacht wird (Sokolov, 1960; Hobson & Brazier, 1980).

Die kortikalen Verbindungen des EW erschöpfend darzustellen, würde den Rahmen dieser Arbeit sprengen: Es sei jedoch darauf hingewiesen, dass ein Einfluss von *visuellen* und nicht-visuellen Kortexarealen besteht (Überblick in Barbur, 2004). Generell erscheinen die Einflussmöglichkeiten kortikaler Nervenzellen - mittelbar oder unmittelbar auf den EW einzuwirken - recht groß. IRENE LÖWENFELD (1973) vertritt in einem Diskurs über „Supra-spinale Hemmmechanismen“ folgende Ansicht:

> *Wegen des komplexen Netzes von Verbindungen zwischen Cortex, Basalganglien, Hypothalamus und anderen Gebieten des Hirnstammes kann [die] Reizung einer gegebenen Stelle auf vielen Wegen den Oculomotoriuskern erreichen, und es wird wohl unmöglich bleiben, durch Reizexperimente die spezifischen zentralen Pupillenerweiterungsbahnen zu definieren.*

Fassen wir zusammen: Der EW ist ein Teil des parasympathischen Nervensystems und für die Pupillenkonstriktion die zentrale Struktur. In dieser zentralen Stellung fungiert er als Sammelbecken vieler Einflüsse, die - mit Ausnahme von prätektalen Neuronen - inhibitorischer Natur sind. Die Inhibition ist notwendig, um im Bedarfsfall die Spontanaktivität zu hemmen. Der EW dient dabei als „signal generator“ (Barbur, 2004, S. 6), der durch die Modifikation seiner Feuerrate eine Pupillenreaktion in die eine oder andere Richtung veranlasst: Bei *Abnahme* der Feuerrate erschlafft der Konstriktormuskel der Iris, was dem sympathisch innervierten Dilatormuskel die Möglichkeit einräumt, die Pupille - je nach sympathischer Aktivität, die zu diesem Zeitpunkt vorliegt - weit zu stellen. Bei *Steigerung* der EW-Feuerrate *kontrahiert* sich die Pupille, weil der radiär angeordnete

Konstriktormuskel aktiviert wird. Da dieser Muskel der stärkere ist (Wilhelm, 1991, S.22) kann eine gleichzeitig ablaufende sympathischen Erregung nur wenig bis gar keinen Effekt ausüben: Die Folge ist eine verengte Pupille *trotz* sympathischer Aktivität.

3.3 Stand der allgemeinen Pupillenforschung

Wir werden zunächst die gut untersuchten Reflexe der Pupille wie den Pupillenlichtreflex, den Nähereflex und Aberrationen ansprechen. Im Anschluss wird der Nutzen der Pupillenreflexe im klinischen Alltag skizziert und weitere Einflussfaktoren benannt.

3.3.1 Primäre Pupillenfunktionen

Pupillenbewegungen sind ihrer Hauptfunktionen nach zunächst einmal *optischer* Natur, d.h. die Pupille hat in erster Linie Aufgaben zu erfüllen, die dem wachen Organismus optimale Sehverhältnisse ermöglichen sollen. Zu diesen optimalen Sehverhältnissen zählt der wohl bekannteste Reflex der Pupille, nämlich der **Pupillenlichtreflex**: Bei hellen Lichtverhältnissen werden die Pupillen klein, bei dunklen groß. Diese Größenveränderung ist besonders wichtig bei extremen Lichtverhältnissen (z.B. Spaziergang bei Nacht oder an einem sonnigen Tag). Das Ziel dieser Pupillengrößenveränderungen ist, der Retina eine angemessene Menge an Licht zur Verfügung zu stellen, damit die Photorezeptoren weder zu viel noch zu wenige Photonen erhalten. Ein zweiter wichtiger optischer Effekt von Größenveränderungen der Pupille ist der **Nähe-Reflex**, d.h. der für die Regulierung der Tiefenschärfe[8] zuständig ist: Bei nah akkommodierten Augen werden die Pupillen reflektorisch kleiner, wodurch die Tiefenschärfe zunimmt. Der optische Gewinn liegt darin, dass auch bei der Betrachtung naher Gegenstände weiter entferntere immer noch (relativ) scharf abgebildet werden, was bei großer Pupille nicht der Fall wäre. Schließlich werden durch verengte Pupillendurchmesser **Aberrationen**[9] reduziert, was wiederum dem optischen System bzw. der Sehschärfe zugute kommt.

3.3.2 Klinischer Nutzen der Pupillenfunktionen

Größenveränderungen von Pupillen dienen sowohl in der Medizin als auch der Physiologie als Indikator für Funktionen des Zentralnervensystems: In der Anästhesiologie zum Beispiel

[8] Tiefenschärfe beschreibt die Tiefenausdehnung derjenigen Raumzone, die eine Linse scharf abbildet.
[9] Aberrationen sind Lichtstrahlenabweichungen: die am Linsen*rand* durchtretenden Lichtstrahlen brechen stärker als die zentral hindurchtretenden.

wird der Pupillendurchmesser als primäres klinisches Zeichen für die Tiefe der Narkose verwendet (Collins, 1966). In der Neurologie wird mithilfe der Pupillen und deren Bewegungen die Integrität der Stammhirnkerne und deren neuronale Verbindungen überprüft (Adams & Victor, 1981). Und auch in der Neurophysiologie rekrutierten Forscher wie MORUZZI (1972) die Pupillengrößenveränderungen, um den aktuellen Zustand des aufsteigenden retikulären aktivierenden Systems (ARAS) zu bestimmen.

3.3.3 Übersicht weiterer Einflussfaktoren auf das Pupillenverhalten

In den nachfolgenden drei Tabellen (Tab. 1, 2 und 3) sind Einflussfaktoren und deren Quellen aufgelistet, die den Pupillen-Durchmesser (beim Menschen) verändern können. Diese Einflussfaktoren sind gruppiert nach physikalischen, körperlichen, krankheitsbedingten sowie psychophysischen und psychischen Faktoren. Da einige Einflussfaktoren häufiger beschrieben wurden, handelt es sich bei den angeführten Quellen nur um Beispiele.

Der nachfolgende Überblick ist im Wesentlichen tabellarisch gestaltet, so dass ein grob skizzierter Eindruck über die mannigfachen Einflussmöglichkeiten gewonnen werden kann. Dabei wird i.d.R. nicht näher auf die einzelnen aufgelisteten Untersuchungen eingegangen, da diese keine direkte Relevanz für die vorliegende Arbeit haben. Sowohl die Abfolge der Gruppen als auch die Reihenfolge der Einflüsse innerhalb der Gruppen ist willkürlich gewählt.

Im Anschluss möchte ich jedoch auf eine für diese Arbeit sehr wichtige Pupillenantwort zu sprechen kommen, die psychosensorische Pupillenreaktion.

Tab. 1: *Physikalische und körperliche Einflussfaktoren auf den Pupillendurchmesser*

Physikalische Einflüsse auf den Pupillendurchmesser		
Einfluss	Auswirkung	Quelle (Beispiel)
Leuchtdichte	Erhöhung der Leuchtdichte führt in gewissen Grenzen zur Verringerung des Pupillendurchmessers	Loewenfeld (1966)
Wellenlänge	größere Erweiterung bei chromatischen im Vergleich zu achromatischen Stimuli (1) kleinerer Durchmesser bei mittleren Wellenlängen (2)	1. Bouma (1962) 2. Wilhelm (1991)
Magnetische Felder	am Hinterkopf induzierte magnetische Felder unterdrücken den Pupillenlichtreflex	Kardon & Mooren (1995)
Entfernung von Objekten	Verengung bei Nahakkommodation	Lowenstein & Loewenfeld (1964)
Dunkelheitsreflex	bei Unterbrechung eines konstantes Lichtes kurzzeitige Pupillenerweiterung	Lowenstein & Loewenfeld (1964)
Körperliche Einflüsse auf den Pupillendurchmesser		
Einfluss	Auswirkung	Quelle (Beispiel)
beidäugige Summation	binokulare Lichtstimulation resultiert in größere Pupillenverengung als monokulare	Thompson (1947)
Lidschluss	kurze Verengung der Pupille, gefolgt von einer Rückerweiterung	De Launey (1949)
Schwankungen im Regelkreis der Pupille	starke Pupillendurchmesserschwankungen (Hippus)* bei sonst konstanter Umgebung	Yoss et al. (1970)
körperliche Anstrengung	bei Anstrengung Erweiterung, bei Erholung Verengung der Pupille (1) keine Unterschiede bei den Resultaten vor und nach der Anstrengung (2)	1. Ishigaki (1991) 2. Woods & Thompson (1995)
Alter	kleinere Durchmesser und erhöhte Variabilität in höherem Alter	Kumnik (1954)

*Anmerkung: Der Begriff Hippus wird im Zusammenhang mit physiologischer Pupillenunruhe verwendet, wobei es sich i.d.R. nicht um ein Krankheitszeichen handelt, sondern um eine Widerspiegelung der Aktivität des Vegetativums. Bei normaler Funktion der Pupille findet sich fast immer eine Oszillation der Pupillenweite, die Amplitude und Frequenz dieser Oszillationen kann jedoch sowohl intra- als auch interindividuell sehr variieren: Die Frequenz beträgt beim jungen Menschen im Hellen ca. 2-3 Zyklen pro Sekunde. Bei Ermüdung nehmen die Oszillationen in ihrer Amplitude deutlich zu, da vermutlich die zentrale Hemmung des Okulomotorius-Komplexes abnimmt (aus Wilhelm, 1991, S. 142).

Tab. 2: *Krankheitsbedingte, psychophysische und psychische Einflussfaktoren auf den Pupillendurchmesser*

Krankheitsbedingte Einflüsse auf den Pupillendurchmesser		
Einfluss	Auswirkung	Quelle (Beispiel)
Farbenblindheit	bei Rot-Grün-Schwäche geringere Reaktion auf rotes Licht, bei anderen Arten der Farbenblindheit keine signifikanten Einflüsse	Miyao et al. (1991)
Geistige Behinderung	geringere Pupillendurchmesser bei kognitiven Aufgaben als bei Normalprobanden	Boersma (1970)
Schizophrenie	verminderte Pupillenreaktion auf mentale Beanspruchung	Steinhauer & Hakarem (1979)
Autismus	autistische Kinder haben kleinere Pupillendurchmesser und geringere Pupillenreaktionen	Rubin (1961)
Anorexia nervosa	verkürzte Pupillenreaktionszeiten und stärkere Durchmesserveränderungen	Grünberger et al. (1992)
Migräne	Verstärkter Pupillenlichtreflex	Mylius (2002)
Diabetis mellitus	größere Pupillen bei Helligkeit und verminderte Reaktion auf Lichtblitze	Papakostopoulos et al. (1991)
Psychophysische und psychische Einflüsse		
Einfluss	Auswirkung	Quelle (Beispiel)
Sympathie - Apathie	Präsentation von angenehmen Bildern (1), favorisierte Politikern (2), potenziellen Sexpartnern (3) folgt eine Pupillendilatation	1. Hess & Polt (1960) 2. Hess (1965) 3. Hess et al. (1965)
Pupillengröße einer anderen Person	größere Pupillen eines Gegenübers verursachen eigene Pupillenvergrößerung	Hess (1972)
Belohnung	erweitert den Pupillendurchmesser nur bei einfachen Aufgaben	Kahneman et al. (1968)
Intelligenz	Personen mit hohem IQ zeigen weniger Dilatation als Personen mit niedrigem IQ beim Lösen der gleichen Aufgaben	Beatty (1982)
Ermüdung	Verringerung des Pupillendurchmessers; Amplitude und Frequenz des Hippus werden größer, Alter verstärkt die Effekte	Lowenstein & Loewenfeld (1964)
Angst	Angst vergrößert den Pupillendurchmesser	Nunnally (1969)
Schmerz	Schmerz vergrößert den Pupillendurchmesser	Westphal (1920)
Informationsverarbeitung	die Pupille erweitert sich mit zunehmender Aufgabenschwierigkeit	Beatty (1982)

Tab. 3: *Veränderungen des Pupillendurchmessers aufgrund von Drogen*

Einflüsse aufgrund von Drogen		
Einfluss	Auswirkung	Quelle (Beispiel)
Alkohol	steigender Pupillendurchmesser bei steigendem Blutalkoholgehalt (1); weniger Reaktion auf mentale Beanspruchung (1+2)	1. Skoglund (1943) 2. Bradshaw (1970)
Alkoholab-hängigkeit	je stärker die Abhängigkeit, desto kleiner der Pupillen-durchmesser	Grünberger et al. (1988)
Kokain	Pupillenerweiterung	Wilhelm (1991)
Heroin und andere Opiate	Pupillenverengung	Grünberger et al. (1990)
Amphetamine	Pupillenerweiterung	Bradshaw (1970)

Wie wir aus diesen Tabellen entnehmen können, ist eine sorgfältige Auswahl von Vpn dringend notwendig, um die experimentellen Daten, die bei den Variationen der unabhängigen Variablen entstehen nicht mit anderen Einflüssen zu kontaminieren.

3.4 Psychosensorische Pupillenreaktionen

Die sog. psychosensorische Pupillenreaktion schlägt eine Brücke zwischen den einerseits gut verstandenen Pupillenlicht- und Nähereflexen und den andererseits nicht so gut verstandenen Pupillengrößenveränderungen, die bei kognitiven und emotionalen Prozessen auftreten und deren neuronalen Mechanismen vermutlich komplexer sind. Die psychosensorische Reaktion ist hierbei immer eine Pupillen*dilatation*. Sie kann entweder durch sehr intensive und/oder aufgabenrelevante Stimuli hervorgerufen werden, wobei prinzipiell alle sensorischen Empfindungen einen Einfluss haben können. Darüber hinaus müssen nicht einmal *externale* Reize vorliegen; ebenso vermögen *internale* wie Kognitionen, Emotionen und geistige Anstrengung, die Pupillengröße zu modifizieren (*psycho*-sensorisch). Bei dieser Reaktion zeigt sich, dass eine Pupillendilatation nicht unbedingt von physikalischen, sondern mehr von aufgabenspezifischen Stimulusmerkmalen abhängt, weswegen diese Art der Pupillenreaktion auch *aufgabenevozierte Pupillenantwort* bzw. task-evoked pupillary response (TEPR) bezeichnet wird. Auch ist zu beachten, dass i.d.R. von einem „Response“ und nicht von einem „Reflex“ gesprochen wird, wodurch unterstrichen wird, dass die TEPR an gewisse Bedingungen geknüpft ist, d.h. nicht wie ein Reflex bedingungslos ablaufen muss. Zudem sind die psychosensorischen Antworten relativ klein (0,1 bis max. 0,5 mm), verglichen mit denen des Pupillenlichtreflexes, die mehrere Millimeter ausmachen können. Diese relativ

schwachen psychosensorischen Antworten lagern sich auf die ohnehin leicht oszillierenden Pupillenbewegungen auf, so wie es bei ereigniskorrelierten Potenzialen (EKPs) und dem Spontan-EEG der Fall ist. Hier wie dort werden relativ schwache Signale durch das Herausrechnen der Spontanaktivität auswertbar.
Interessant ist zudem die Beobachtung, dass die TEPR immer eine Dilatation (keine Konstriktion) der Pupille darstellt. Es muss nach den bisherigen Ausführungen also eine zentrale Hemmung des parasympathischen Okulomotoriuskerns (EW) erfolgen, die synergistisch – je nach Intensität der TEPR - mehr oder weniger mit einer Sympathikusstimulation einhergeht. Somit dient der Sympathikus - gemeinsam mit zentralen Hemmungsfaktoren - der Grundeinstellung der Pupillenweite, die zu jedem Zeitpunkt als ein Kompromiss sympathischer und parasympathischer Einflussnahme verstanden werden kann.

3.4.1 Anwendungsgebiete der psychosensorischen Reaktionen

Die erste Beschreibung psychosensorischer Reaktionen kann datiert werden auf das Jahr 1904, als der Neurologe und Psychiater OSWALD BUMKE (1904) zu folgender Feststellung gelangte:

> *… überhaupt jedes lebhaftere geistige Geschehen, jede psychische Anstrengung, jeder Willensimpuls, ob er nun eine Muskelaktion zur Folge hat oder nicht, jedes Anspannen der Aufmerksamkeit, jede lebhafte Vorstellung, gleichviel welchen Inhalts, und namentlich jeder Affekt ebensowohl eine Pupillenerweiterung bewirkt, wie jeder dem Gehirn von der Peripherie zufließende sensible Reiz (S.37).*

Erst in den 1960er Jahren wurden diese Erkenntnisse erneut aufgegriffen: In der Emotionsforschung interessierten sich Psychologen dafür, ob die Pupillenweite Emotionen wie Sympathie und Antipathie widerspiegeln könne. ECKART HESS postulierte die sog. Aversions-Kontriktions bzw. Appetenz-Dilatations-Theorie, nach der sich die Pupille verenge, wenn ein unangenehmer Stimulus erblickt werde und erweitern, wenn ein angenehmer erschien (Hess, 1965; Hess & Polt, 1960; Hess et al., 1965). Diese Untersuchungen wiesen jedoch erhebliche methodische Mängel auf, so dass deren Ergebnisse vielfach in Frage gestellt wurden (vgl. Janisse, 1977). JANISSE (1974) überprüfte darum in einer (methodisch weniger anfechtbaren) Untersuchung erneut die von HESS propagierten valenzspezifischen Pupillenreaktionen: Die Studie brachte zutage, dass nicht nur positive,

sondern auch negative Gefühle zu einer Pupillendilatation führten. JANISSE erklärte diesen Befund mit einem allgemeinen unspezifischen Erregungsanstieg, der nicht von der Valenz eines Reizes (positiv vs. negativ), sondern mehr von dem Auftreten einer Emotion *per se* abhängig ist.

BEATTY und KAHNEMAN (1966) z.B. ließen Vpn Zahlenketten, die ihnen kurz zuvor präsentiert worden waren, wiederholen. Diese Aufgabenstellung brachte zutage, dass die Pupille immer weiter wurde, je mehr Zahlen sich die Probanden merken sollten. Die Dilatation erreichte allerdings bei etwa sieben Zahlen ihr Maximum und stagnierte auf diesem Niveau. Erst als die jeweilige Merkaufgabe beendet war, kontrahierte sich die Pupille wieder. Wenn die Untersucher daraufhin erneut darum baten, die siebenstellige Zahlenkombination zu wiederholen, weiteten sich Pupillen wieder, und zwar auf das Maß, das sie zuvor bei dieser Aufgabe (mit sieben Zahlen) erreicht hatten. Auch mit anderem Lernmaterial wie z.B. Buchstaben, Sätzen oder Rechenaufgaben konnte eindrucksvoll gezeigt werden, dass die Pupillenweite die mentale Anstrengung sehr zuverlässig wiedergab (vgl. Kahneman, 1973; Beatty, 1986; Beatty & Luzero-Wagoner, 2000). BEATTY fordert in einem TEPR-Review von 1982:

> *A physiological measure of processing load or "mental effort" required to perform a cognitive task should accurately reflect within-task, between-task, and between-individual variations in processing demands.*

und schließt mit den Worten:

> *… the task-evoked pupillary response fulfills these criteria (S.276)*

Verlassen wir den mentalen Bereich und wenden uns nun dem Pupillenverhalten bei der subliminalen Informationsverarbeitung zu: HAKAREM und SUTTON (1966) untersuchten das Pupillenverhalten von normalsichtigen Vpn, die zunächst für 20 Minuten dunkeladaptiert waren und dann für Bruchteile einer Sekunde (10 ms) einen schwachen Lichtreiz (6×10^{-5} mL ~ 0,0002 cd/m²)[10] dargeboten bekamen. Diese geringe Leuchtdichte lag auf Schwellenniveau und war darum für die Probanden kaum bzw. nur schwer erkennbar. Die Vpn hatten in jedem Trial die Aufgabe, durch einen Tastendruck anzugeben, ob sie das Licht gesehen haben oder nicht („report"-Bedingung). Falls sie den Stimulus als „gesehen" angaben, dilatierte die Pupille, falls sie ihn als „nicht gesehen" deklarierten, dilatierte die Pupille kaum bzw. nicht. In beiden Fällen war der Lichtblitz jedoch in gleicher Intensität und Präsentationsdauer

[10] 1 cd/m² (Candela pro Quadratmeter) entspricht 0,3142 mL (Millilambert)

dargeboten worden. Aufgrund der Tatsache, dass eingestreute „Leer"-Trials, in denen die Intensität nur 1/10 betrug und somit unterhalb der Wahrnehmungsschelle lag, eine ähnlich schwache Pupillenantwort evozierte wie die von „nicht gesehenen" Lichttrials, schlossen die Autoren, dass der Mechanismus, der die Pupillenreaktion auslöst, derselbe sei wie der, der einen Lichtreiz bewusst werden lässt.

Ob auch eine Korrespondenz zwischen visueller Bewusstheit und der *späten* Pupillenantwort besteht, ist Gegenstand der Arbeit. An dieser Stelle sei aber schon hervorgehoben, dass es sich bei der Pupillenreaktion im Experiment von HAKAREM und SUTTON *nicht* um einen Pupillenlichtreflex gehandelt haben kann, denn - abgesehen von der äußerst geringen Lichtintensität (10^{-6} mL gilt als absolutes Schwellenniveau, Riggs, 1965) – der Pupillenlichtreflex hätte die Pupille verengen müssen. Da sie aber dilatierte, liegt der Schluss nahe, dass der Lichtreiz nicht so sehr als Licht *per se*, sondern mehr als *Signal* verarbeitet wurde. Diese Form der Informationsverarbeitung fällt vor allem dem aufsteigenden retikulären aktivierenden System (ARAS) zu und scheint weniger Reizintensität zu bedürfen als das System, dass für den Pupillenlichtreflex verantwortlich ist (Hakarem & Sutton, 1966).

Ein zweites interessantes Ergebnis dieser Studie war, dass das gleiche experimentelle Design - nur dieses Mal in einer „no report"-Bedingung (die Vpn betrachteten „passiv" die Lichtquelle) - zu deutlich weniger Pupillendilatation führte als in der zuvor beschriebenen „report"-Bedingung. HAKAREM und SUTTON interpretierten diesen Unterschied dahingehend, dass die Instruktionen (report vs. no-report) ein unterschiedliches Vigilanzniveau zur Folge hatten, welches in der no-report Bedingung möglicherweise den Dilatationsunterschied bewirkt hat.

Wir halten darum vorläufig fest, dass vielleicht auch die Vigilanz und / oder Aktivierung des Probanden für die Amplitude der Dilatation eine wichtige Rolle spielt.

3.4.2 Pupillometrie beim Blindsehen

TOELSTRA (1968) fand bei Patienten mit postgenikulären Läsionen eine Pupillenreaktion nach Einsetzen eines im blinden Feld flackernden Lichtreizes, SLOTER und VAN NORREN (1980) ermittelten mittels der Pupillometrie die Sehschärfe aufgrund von Schachfeldreizen (checkerboard) im blinden Feld, YOUNG and ALPERN (1980) sowie YOUNG und Kollegen (1993) fanden eine implizite Verarbeitung farblicher Stimuli, WEISKRANTZ und Kollegen (1998) sowie SAHRAIE und Mitarbeiter (2002) eine der Ortsfrequenz von Gaborreizen (Abb. 7).[11] Die Tatsache, dass sich die Pupillengröße auch auf *räumliche* Parameter von visuellen Reizen veränderte, nutzten WEISKRANTZ und Kollegen (1998) sowie SAHRAIE und Mitarbeiter (2002) dazu, nun auch einen direkten Vergleich der beiden Messmethoden anzustellen: In beiden Studien kamen sie zu dem Ergebnis, dass sich die psychophysischen und pupillometrischen Daten weitestgehend deckten, wobei jetzt schon darauf verwiesen sei, dass die Psychophysik zu einem anderen Zeitpunkt als die Pupillometrie erfasst wurde.[12] WEISKRANTZ (1999, S.71) fasste die Daten von 20 Patienten zusammen, die sowohl pupillometrisch als auch psychophysisch Gaborreize im blinden Feld detektieren sollten. Das Ergebnis ist in Abbildung 8 erkennbar und lässt auf den ersten Blick wenig Zweifel aufkommen, dass - zumindest für diesen Aufgabentyp – ein linearer Zusammenhang von Psychophysik und Pupillometrie besteht. Aufgrund dieses

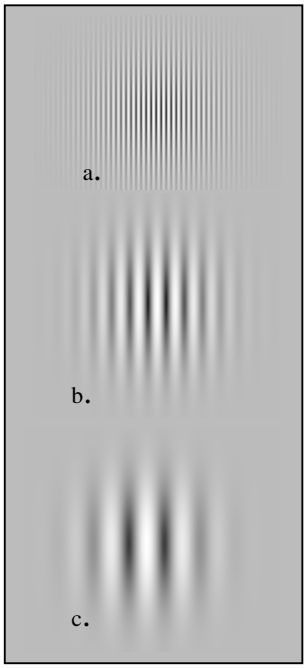


Abb. 7: *Gaborreize mit a. hoher, b. mittlerer und c. niedriger Ortsfrequenz.*

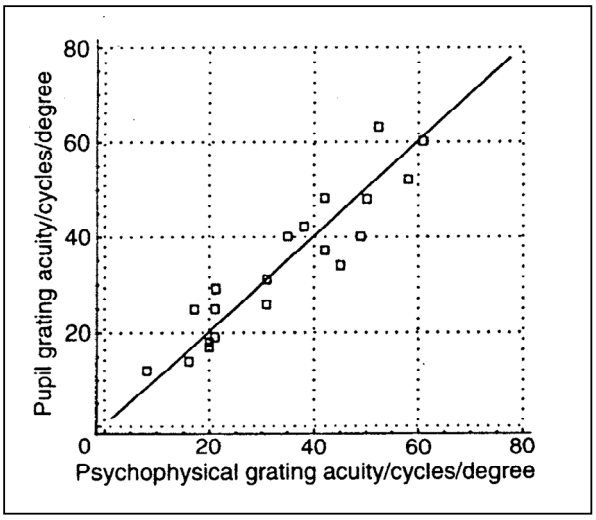


Abb. 8: *Pupillometrische Befunde (Ordinate) in Abhängigkeit von psychophysischen (Abszisse)*

[11] Diese Aufzählung ist nicht erschöpfend; für einen Überblick sei Barbur (2004) empfohlen.
[12] Die Tatsache, dass die psychophysischen und pupillometrischen Daten für ein und dasselbe Experiment getrennt erhoben wurden, spielt für die pupillometrische Antwort eine wichtige Rolle, auf die ich noch zu sprechen komme.

Zusammenhangs besteht nun die Möglichkeit, Probanden zu testen, bei denen eine normale Kommunikation erschwert (z.B. Kinder, Aphasiker, fremdsprachige Vpn, Tiere) ist oder Probanden, die nicht antworten wollen. Dass einige Patienten nicht antworten wollen bzw. nicht für Experimente mit 2-AFC-Aufgaben oder Übungen eines Restitutionstrainings zu gewinnen sind, liegt u.a. daran, dass sie keinen Sinn sehen, auf ungesehene Reize zu reagieren bzw. sie zu beurteilen. Einmal mehr unterstreicht diese Verhaltensbeobachtung, wie real die Blindheit für die Betroffenen ist.[13] Mit der pupillometrischen Messung jedoch werden sie nicht genötigt, eine Antwort abgeben zu müssen auf etwas, was in ihren Augen (genauer: in ihrem visuellen Kortex) nicht vorhanden ist. Insofern stellt die Pupillometrie durchaus eine Bereicherung der Blindseh-Methoden dar und ermöglicht darüber hinaus – auch dies ist ein wichtiger Punkt - einen direkten Vergleich von Pupillenreaktionen menschlicher und tierischer Primaten (Weiskrantz et al., 1998; Sahraie et al., 2002).

Als weiterer Vorteil der Pupillometrie wird die sog. Kriteriumsunabhängigkeit angeführt: Das Kriterium beschreibt bei einem Experiment die Grenze zwischen Zustimmung (z.B. „Ja, ich glaube, dass der Reiz da war“) und Ablehnung (analog: „Nein, ich glaube nicht, dass der Reiz da war“): Bei einem strikten (konservativen) Kriterium wird eine zum Raten „gezwungene“ Vp eher „Nein“ sagen, währenddessen eine mit laxem (liberalem) Kriterium eher „Ja“ antworten würde. Das Kriterium selber wird von einer Reihe psychologischer Variablen beeinflusst wie zum Beispiel Motivation, Wunsch, Sympathie bzw. Antipathie und auch der Persönlichkeit eines Menschen. Eine Sorge nun betrifft die Interpretation von direkten Verfahren, denn Vpn könnten ihr Antwortkriterium von Situation zu Situation bzw. von Messzeitpunkt zu Messzeitpunkt verschieben. Durch eine Verschiebung des Kriteriums aber würden unterschiedliche Befunde resultieren, *obwohl* die Sensitivität des Patienten nicht verändert wäre, d.h. die Entdeckungsfähigkeit hätte sich aufgrund der Datenlage verschoben, de facto wäre sie aber gleich geblieben. Diesem Problem nimmt sich die Signal-Entdeckungs-Theorie an, die zwischen der tatsächlich vorliegenden Sensitivität (in Form von d’) und psychologischen Einflussfaktoren wie oben genannt (in Form von ß) zu unterscheiden vermag (Green & Swets, 1974; Velden, 1982). Leider ist deren Anwendung sehr aufwendig, so dass sie in der Blindsehforschung nur selten angewendet wurde (z.B. Stoerig et al., 1985). Mittels der Pupillometrie jedenfalls lasse sich - so WEISKRANTZ und SAHRAIE – diese mögliche Störvariable vermindern bis vermeiden. Ob sich die Pupille allerdings tatsächlich unabhängig von möglichen Antworttendenzen verhält, ist nach meinem Kenntnisstand noch nicht

[13] Diese Überlegungen treten vermutlich – ob nun ausgesprochen oder nicht – bei vielen rindenblinden Patienten auf, die mit direkten Verfahren untersucht bzw. trainiert werden. Dies führte letzten Endes dazu, dass indirekte Verfahren entwickelt wurden, bei denen die Patienten eine Aufgabe im *gesunden* Gesichtsfeld bearbeiteten.

hinreichend untersucht. Ebenso wenig untersucht sind die Möglichkeiten der *willkürlichen* Steuerung der Pupillenweite: In Anbetracht von erfolgreichen Biofeedback-Studien und Behandlungen psychosomatischer Störungen (vgl. Rief & Birbaumer, 2000), die u.a. auf Kontrolle des vegetativen Nervensystems abzielen, wäre eigentlich auch auf Pupillenebene eine prinzipielle Erlernbarkeit von willkürlichen Pupillenbewegungen zu fordern. Der literarisch interessierte Leser möge sich den Selbstversuch von THOMAS MANN nicht entgehen lassen.[14]

Fazit: In der Blindseh-Forschung wird die Messung der Pupillenweite als psychophysiologische Methode geschätzt, weil deren Daten erstens (relativ) frei von Reaktionstendenzen, zweitens unberührt von Sprachkenntnissen bzw. –irritationen sind und drittens mit psychophysischen Daten eine hohe Übereinstimmung aufweisen. Es muss allerdings an dieser Stelle nochmals betont werden, dass die korrespondierenden pupillometrischen Daten stets aus *frühen* Pupillenantworten (Pupillenlichtreflex, Antworten auf Ortsfrequenz und Farbstimuli) bestanden; die hier vorliegende Arbeit wird jedoch auf relativ späte Pupillenantworten zurückgreifen, von denen weiter unten die Rede sein wird.

Kommen wir noch einmal auf das Nachexperiment von HAKAREM und SUTTON (1966) zu sprechen: Die genannte Autoren berichteten, dass in der „no report"-Bedingung weniger bzw. keine Pupillenreaktion bei Darbietung eines schwachen Lichtreizes beobachtbar waren. Die Ursache für die fehlende Pupillenreaktion war den Autoren nicht bekannt, sie vermuteten aber einen Vigilanz-Abfall, der möglicherweise durch die „passive" Instruktion bedingt sei. Warum ist dieses Nachexperiment so wichtig? Weil es von den Anforderungen bzw. Instruktionen an die Vpn vergleichbar ist mit den Studien, die unter der Leitung von WEISKRANTZ und SAHRAIE durchgeführt wurden: Deren Instruktionen an die Vpn war ebenfalls *passiver* Natur und entsprach damit der „no-report"-Bedingung aus HAKAREM und SUTTONs Studie. Daraus ergibt sich folgendes Gedankenexperiment, das nach meinem Kenntnisstand in der Blindsehforschung noch nicht umgesetzt wurde: Kann die psychosensorische Pupillenreaktion, die sich bei dem subliminalen

[14] (aus „Felix Krull" von Th. Mann): *Man weiß, dass die Pupillen unseres Auges in ihren Bewegungen, welche in einer Verengung und Erweiterung bestehen, abhängig sind von der Stärke des Lichtes, das sie trifft. Ich nun hatte es mir in den Kopf gesetzt, diese unwillkürliche Bewegung eigensinniger Muskeln unter den Einfluss meines Willens zu beugen. Vor meinem Spiegel stehend und indem ich jeden anderen Gedanken auszuschalten suchte, versammelte ich meine ganze innere Kraft auf den Befehl an meine Pupillen, sich nach meinem Belieben zusammenzuziehen oder zu erweitern, und meine hartnäckigen Übungen wurden, wie ich versichere, wirklich von Erfolg gekrönt. Anfangs gerieten unter den inneren Anstrengungen, die mir den Schweiß austrieben und mich die Farbe wechseln ließen, meine Pupillen nur in ein unregelmäßiges Flackern; später aber hatte ich es tatsächlich in meiner Gewalt, sie zu winzigen Pünktchen sich verengern oder zu großen schwarz spiegelnden Kreisen sich ausdehnen zu lassen, und die Genugtuung, die dieser Erfolg mir gewährte, war fast schreckhafter Art und von einem Schauer vor den Geheimnissen der menschlichen Natur begleitet.*

Wahrnehmungsexperiment von HAKAREM und SUTTON (1966) als sehr sensitiv für Verarbeitungsprozesse erwiesen hat, auch bei ungesehenen Reizen rindenblinder Patienten evoziert werden? Nehmen wir hypothetisch an, dass dies tatsächlich möglich ist, welches experimentelle Design und welches Stimulusmaterial würde eine Pupillenantwort am ehesten versprechen? Hier bietet sich ein Paradigma an, das sich in Kognitiven Psychologie bewährt hat und dessen Effekt durch die *Auftretenswahrscheinlichkeit* von Reizen begründet ist. Es handelt sich um den sog. Stimulus-Probability-Effect, der den dritten Baustein für die anschließende Hypothesengenerierung darstellen wird.

3.4.3 Der „Stimulus-Probability-Effect" (SPE)

Der SPE begann seine wissenschaftliche Erfolgsgeschichte in den 70er Jahren des letzten Jahrhunderts und stellt eine Untergruppe der psychosensorischen Reaktionen dar.[15] Die Antworten der Pupille können nach somatosensorischer, akustischer oder visueller Stimulation auftreten (Qiyuan et al., 1985) und erscheinen somit modalitätsunabhängig zu sein.[16] Wichtig ist nicht, um *was* für einen Stimulus es sich handelt, sondern mit *welcher* Wahrscheinlichkeit er auftritt bzw. erwartet wird. Von Reaktionszeit-Experimenten wissen wir bereits (La Berge & Tweedy, 1964), dass Vpn schneller auf Reize reagieren, wenn eben diese Antwort häufig gegeben wird. Dieser Effekt wurde als „*Response*-Probabilty-Effect" bekannt. Wenige Jahre später zeigten LA BERGE UND KOLLEGEN (1969) sowie BIEDERMAN und ZACHARY (1970), dass Stimuli, die mit hoher Wahrscheinlichkeit präsentiert worden waren, zu schnelleren und genaueren Reaktionen führten als Stimuli mit gleicher oder niedriger Wahrscheinlichkeit. Diesen *psychophysischen* SPE stellten FRIEDMAN und Kollegen (1973) *pupillometrisch* auf die Probe: Das Ergebnis erbrachte auch hier einen signifikanten SPE, und zwar in Form einer verstärkten Dilatation auf selten dargebotene visuelle Reize. FRIEDMAN und seine Arbeitsgruppe untersuchte in einem Nachexperiment, ob der SPE sich auch zeigen würde, wenn die Probanden über die Auftretenswahrscheinlichkeit der Reize a priori informiert wurden und auch hier zeigte sich der SPE. Die genannten Forscher gingen noch einen Schritt weiter: Wie verhielte sich nun der Pupillendurchmesser, wenn die Vpn die Auftretenswahrscheinlichkeit kennten und darüber hinaus wüssten, wann genau der seltene Reiz dargeboten werden würde?[17] In dieser Reizanordnung wurde nun

[15] Die *evolutionäre* Erfolgsgeschichte ist ungleich länger, da dieser Effekt bis hinab zu Amphibien beobachtbar ist (Loewenfeld & Lowenstein, 1966; zitiert aus Qiyuan, 1985).
[16] Nach meinem Kenntnisstand liegen keine Untersuchungen zum SPE bei olfaktorischer oder gustatorischer Stimulation vor.
[17] Die Instruktion lautete, dass exakt jede fünfte Reizdarbietung das Target sei.

deutlich, dass nicht nur die Seltenheit eines Reizes den SPE evozierte, sondern auch die Erwartung eine Rolle spielt, denn der SPE war auf Pupillenebene nicht mehr nachweisbar.

QIYUAN et al. (1985) untersuchten einige Jahre später den pupillometrischen SPE mit *akustischen* Stimuli: Die Probanden zählten Töne, die sich in der Frequenz (1100 Hz vs. 1150 Hz) und der Auftretenswahrscheinlichkeit (20:80; 50:50 und 80:20) unterschieden. Auch hier zeigte sich ein signifikanter SPE, wobei in posthoc-Tests nur die Dilatation in den 20% zu 50% und 20% zu 80%-Bedingungen signifikant wurden, nicht aber die Bedingung von 50% zu 80%. Ferner zeigte sich in einem Nachexperiment, dass auch die Auslassung eines Tons von der Pupille wie eine Stimulusdarbietung reflektiert wurde: Die Dilatation hatte sogar vergleichbare Amplitudenwerte wie die der wirklichen Reizdarbietung. Als in einem weiteren Nachexperiment nun die Tonauslassungen das Target darstellten (und diese gezählt werden sollten), zeigte eine seltene Auslassung eine sogar noch stärkere Dilatation als eine seltene Reizdarbietung.

3.5 Vorläufige Zusammenfassung und Hypothesengenerierung

Auf die Einleitung insgesamt zurückblickend wurde gesagt, dass Pupillenreaktionen davon abhängig sind, ob visuelle Reize bewusst (explizit) oder nicht bewusst (implizit) gesehen wurden. Mit Blick auf frühe Pupillenreaktionen gilt eine weitgehende Deckung von psychophysischen und pupillometrischen Daten. Die späten Pupillenreaktionen haben sich zwar auch bei bewusster Informationsverarbeitung von Reizen gezeigt, bei nicht-bewusster sind sie jedoch fraglich (Tab. 4). Als sensitiven Effekt haben wir den SPE besprochen, der auftritt, wenn ein Reiz vergleichsweise selten auftritt: Der Reiz wird dabei mehr als „Signal“ als in seinen physikalischen Eigenschaften verarbeitet und scheint eine niedrigere Schwelle überwinden zu müssen, als es Reize für das Gewahrwerden benötigen. Allerdings erscheint eine simultane Aufnahme von psychophysischen und pupillometrischen Daten notwendig. Daraus ergibt sich folgende Hypothese: Wenn Vpn visuelle Reize entdecken sollen, die *a.* subliminal bzw. schwellennah und *b.* mit unterschiedlicher Wahrscheinlichkeit dargeboten werden, dilatiert die Pupille der Probanden bei selten dargebotenen Reizen stärker als bei häufig dargebotenen, selbst wenn die psychophysische Entdeckungsleistung auf Rateniveau liegt.

Tab. 4: *Überblick der bisherigen positiven Ergebnisse mit Blick auf Pupillenreaktionen auf Reizdarbietungen mit und ohne Nachweis auf eine implizite Informationsverarbeitung.*

		Zeitfenster der Pupillenauswertung	
		früh (<500ms)	spät (>500ms)
Implizite Informations-verarbeitung	Nachweis-bar	ja	ja
	Nicht nachweisbar	nein	?

4.0 Allgemeiner Methodenteil

Im Allgemeinen Methodenteil werden die für alle Experimente geltenden Bedingungen angesprochen und erörtert.

4.1 Ort und Zeitraum der Untersuchungen

Alle hier vorgestellten Experimente wurden in dem sog. „iView-Labor“ (Raum 23.03.00.24) der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf am Institut für Experimentelle Psychologie II (Lehrstuhlinhaberin: Prof. Dr. P. Stoerig) durchgeführt. Während der Messungen war dieser Raum vollständig abgedunkelt: Lediglich auf der Untersucherseite (siehe Abb. 9) erhellten zwei Bildschirme sowie eine Schreibtischlampe den Raum, so dass die Leuchtdichte im Raum zwischen 0,5 und 1,5 cd/m² betrug. Die Vp saß unterdessen in einer vollständig abgedunkelten Kammer, die zur Rückseite hin geöffnet, nach oben, unten, links und rechts jedoch mit schwarzem Filz ausgekleidet war. Nach vorne schaute die Vp auf einen 19-Zoll-Monitor (Abstand: 68 cm). Der Vorteil der Filz-Auskleidung lag darin, dass kein Streulicht von Stimuli, die im blinden Feld präsentiert wurden, von Gegenständen (z. B. die Antworttastatur) in das intakte Gesichtsfeld fallen konnte. Die Leuchtdichte in dieser Kammer betrug ohne Monitoreinsatz 0 cd/m² und wurde somit vollständig bestimmt durch die Leuchtdichte der jeweiligen visuellen experimentellen Stimulation, also vom Monitor. Zusätzlich befand sich in der Kammer eine Computermaus oder eine Antwortbox, mit der die Probanden ihre Einschätzung bzw. ihre Antwort abgeben konnten. Die Antwortbox und die Hände waren bei der Untersuchung der Patienten ebenfalls unter einem schwarzen Filzstoff „versteckt“, so dass auch von der Handoberfläche keine

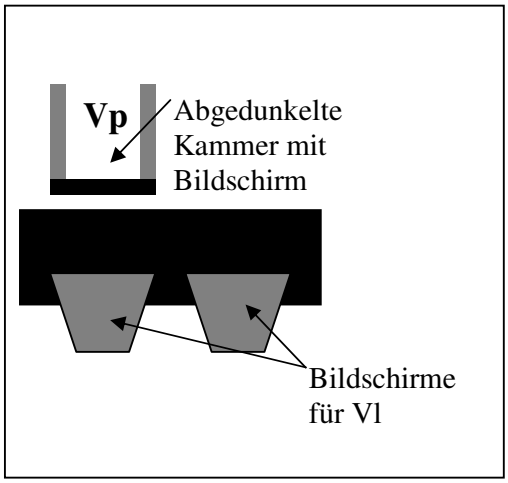


Abb. 9: *Der Experimentalraum in schematischer Darstellung aus der Vogelperspektive; der Versuchsleiter (Vl) hat einen Bildschirm, auf dem er das Auge der Vp mit seinen Reflexen online beobachten kann sowie einen weiteren, auf dem er das Experiment so wie es die Vp dargeboten bekommt sieht. Letztere sitzt in einer mit schwarzem Filz ausgekleideten Kammer zur Vermeidung von Streulicht. Vp und Vl waren durch eine Holzwand getrennt.*

Reflektion möglich war. Die Experimente wurden durchgeführt im Zeitraum von Oktober 2002 bis Juli 2004, nur wochentags von 9 Uhr bis maximal 18 Uhr.

4.2 Stichprobe

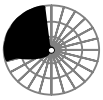
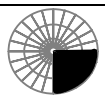
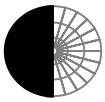
Es haben zwei Gruppen (mit A bzw. B gekennzeichnet) von Vpn an den Experimenten teilgenommen: In den ersten Experimenten (A1 und A2) wurden sehgeschädigte, in den letzten beiden (B1 und B2) normalsichtige Vpn (n=38) untersucht. Die Probanden der Gruppe B waren nach eigenen Angaben frei von neurologischen Erkrankungen und insbesondere frei von Störungen des visuellen Systems. Eine Ausnahme dabei bildeten Schwächen in der Sehstärke, die durch den Einsatz von Brillen bzw. Kontaktlinsen ausgeglichen wurden. Alle Vpn wurden zum Allgemeinbefinden und nach Störungen bzw. Krankheitsbildern befragt, die bekanntermaßen zu Größenveränderungen der Pupille beitragen können (Fragebögen: siehe Anhang; inhaltlich siehe Punkt 3.4.3). Bei den meisten Vpn dieser normalsichtigen Gruppe handelte es sich um Studierende der HHU Düsseldorf. Weitere Angaben zur Stichprobe werden vor der Darstellung des jeweiligen Experimentes gegeben. Die Teilnahme erfolgte freiwillig und ohne Bezahlung.

Zur Gruppe A (n=7) lässt sich sagen, dass alle Patienten eine postgenikuläre Läsion erlitten hatten, die zu Gesichtsfeldausfällen geführt haben. Sie wurden entweder von der Medizinisch-Neurologischen-Radiologischen (MNR) Klinik der Universitätskliniken Düsseldorf vermittelt oder direkt von Frau Prof. Stoerig rekrutiert wurden. Keiner der Patienten war während der Experimental-Phase im Akut-Stadium. In Tabelle 5 sind die sieben untersuchten Patienten zeilenweise mit ihren Initialen verschlüsselt dargestellt; spaltenweise ist das Geburtsjahr, das Alter zum Zeitpunkt der Läsion sowie das der hier vorliegenden Studie, die Ursache der Läsion, der Läsionsort sowie der zum Untersuchungszeitpunkt vorliegende Gesichtsfeldausfall aufgelistet.

Die jüngsten Patienten waren MS und HH und zum Zeitpunkt der Untersuchung 25 bzw. 39 Jahre alt; die übrigen lagen altersmäßig in der Spanne von 63 bis 77 Jahren. Zusätzlich zum Lebensalter der Patienten ist das Alter zu ersehen, in dem die Läsion entstanden ist. Bei HH liegt das ursächliche Ereignis lediglich 2 Jahre zurück, während bei DH und FS eine ungleich längere Zeit von 19 bzw. 23 Jahren verstrichen ist. Die übrigen Patienten liegen dazwischen. Bis auf MS und FS, die beide in einem Verkehrsunfall ein Schädelhirntrauma (SHT) erlitten, liegen bei den übrigen Patienten die Ursachen in einem vaskulären Insult. Bei drei der Patienten (MS, HH, FS) liegt der Läsionsort eher im Temporallappen zu Beginn der Sehstrahlung, bei den übrigen eher im Okzipitallappen gegen Ende der Sehstrahlung bzw.

Bereich des striären Kortex. In Anhang befinden sich kernspintomographische Aufnahmen aller Patienten, die das Ausmaß der Läsion zeigen.

Tab. 5: *Übersicht der Patienten mit Läsionsmerkmalen; für detaillierte Angaben zur Läsion siehe Text und Anhang.*

Patient	Geburts-jahr	Alter bei Läsion/ Studie	Läsions-ursache	Läsionsseite/ -region	Gesichtsfeld*
HH	1962	38 / 40	Insult	rechts / temporal	
MS	1977	21 / 26	SHT	rechts / temporal	
FS	1938	42 / 65	SHT	links / temporal	
BF	1939	62 / 64	Insult	links / okzipital	
KHE	1926	74 / 77	Insult	links / okzipital	
HK	1939	59 / 64	Insult	rechts / okzipital	
DH	1939	44 / 63	Insult	links / okzipital	

* Kombination aus statistischer und dynamischer Perimetrie mit 116', 320 cd/m² auf einem 10 cd/m² Hintergrund; innerhalb schwarz dargestellter Gesichtsfeldanteile wurde das Target nicht entdeckt, innerhalb weißer Anteile wurde es entdeckt.

4.3 Technische Ausrüstung

4.3.1 „Tübinger Perimeter": Die Messung des Gesichtsfeldes

Der individuelle Gesichtsfeldausfall, den die Läsion verursacht hat, wurde bei allen Patienten mithilfe eines TÜBINGER HANDPERIMETER (Goldmann-Standard; Oculus, Wetzlar, Deutschland) ermittelt. Mit diesem Gerät ist eine Kombination aus dynamischer und statischer Perimetrie möglich: Bei der **dynamischen Perimetrie** wird ein Lichtreiz (hier: kreisförmig mit einem Durchmesser von 116 Bogenminuten) langsam (hier: mit 3-5°/Sekunde) von der Peripherie zur Mitte bzw. von der Mitte zur Peripherie bewegt („F" in Abb.10). Die Leuchtdichte des Reizes betrug in dieser Untersuchung 320 cd/m², die des Hintergrundes 10 cd/m². Der Untersuchungsraum war abgedunkelt, nur auf Seiten des Untersuchers leuchtete eine kleine Lampe. Während der Patient nun die Mitte der

Projektionsfläche fixiert („R“ in Abb. 10; roter Punkt von 30 Bogenminuten), soll er über einen Tastendruck - der zu einem akustischen Signal führt - angeben, wann er einen Lichtreiz erstmals gesehen bzw. nicht mehr gesehen hat. Der Untersucher kontrolliert dabei über eine Infrarot-Kamera, ob der Patient zum Zeitpunkt der Reiz-Präsentation a.) gut fixiert und b.) die Augen geöffnet hat, d.h. nicht gerade blinzeln musste. Über die akustische Rückmeldung seitens des Patienten werden nun die Grenzen des Gesichtsfeldes sukzessive erarbeitet, wobei jeder Punkt an den Grenzen mehrfach überprüft wird. Im Anschluss daran erfolgte die **statische Perimetrie**, die innerhalb des mit der dynamischen Vorgehensweise ermittelten Gesichtsfeld-Defektes nun für eine kurze Zeit (hier: 200 ms) den gleichen, aber unbewegten Stimulus (mit denselben Leuchtdichte- und Kontrastverhältnissen) darbot. Besonderes Augenmerk dabei gilt dem Ausschluss von möglichen „Seh-Inseln“, also Gesichtsfeldanteilen, die innerhalb eines Ausfalls intakt geblieben sind, weswegen der Untersucher engmaschig und systematisch innerhalb des blinden Feldes den Ausfall überprüft (vgl. Stoerig et al., 2002). Es wurde bei keinem Patienten eine „Insel“ ausfindig gemacht. Die Perimetrie wurde außerdem stets monokular durchgeführt und deren Ergebnisse sind in Tabelle 5 in der rechten Spalte dargestellt: Zu sehen sind dabei die zentralen 60° Sehwinkel, wobei jeder innerer Kreis 10° Sehwinkel darstellt, so dass je 30° diametral vom Fixationspunkt abgebildet sind. Die Perimetrie ist wegen ihrer großen Bedeutung[18] bei allen Patienten von Frau Prof. Stoerig durchgeführt worden.

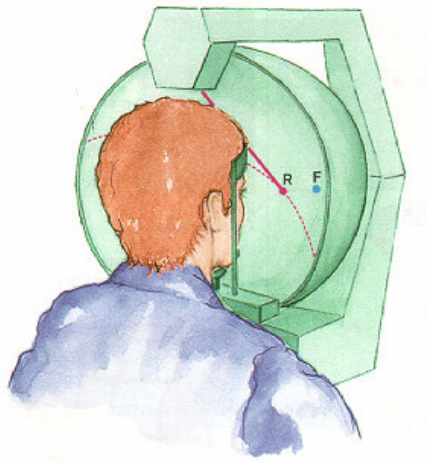


Abb. 10: *Schematische Darstellung einer perimetrischen Untersuchung*

Aus: Klinke & Silbernagel, 1996.

[18] Die perimetrische Befunderhebung ist die Basis für die Diagnose und Therapie des Gesichtsfeldausfalls: Sie ist außerdem sehr wichtig für die Beurteilung des Verlaufes und der Behandlungsmethode. Schließlich können – mit Blick auf diese Arbeit - die Ergebnisse der Patienten nur dann richtig interpretiert werden, wenn die Perimetrie nur von *einer* Person durchgeführt wurde; dies war die Person mit der größten Erfahrung.

4.3.2 „iView®“: Augenbewegungs- und Pupillenmess-System

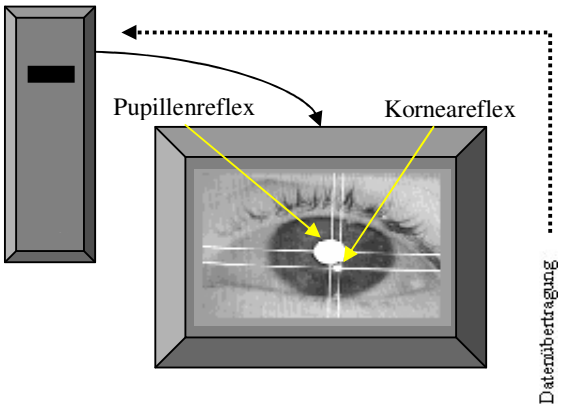


Abb. 11a: *Untersucherperspektive*

Die in dieser Arbeit dargestellten Untersuchungen wurden mit einem Infrarot-Messsystem (RED, remote eye-tracking device) der Firma *Sensomotoric Instruments* (SMI, Teltow, Deutschland) durchgeführt. Dieses System wurde vorrangig entwickelt, um Blickbewegungen aufzuzeichnen; es handelt sich also primär um ein Augenbewegungsmess-System, das allerdings gleichzeitig die Pupillenweite aufzuzeichnen vermag. Da dieses System das Auge des Probanden online stark vergrößert auf einem gesonderten Monitor wiedergibt (Abb.11a), erhielt die zugrunde liegende Soft- und Hardware den Namen „iView“ („i“ gesprochen als *eye*), die in der 3. Version (iView, 3.0®; SMI) dem Institut für Experimentelle Psychologie II zur Verfügung steht. Auf Abbildung 11*a* blickend erkennen wir einen Monitor, auf dem zwei Fadenkreuze (weiße Linien) abgebildet sind, in deren jeweiligen Kreuzungspunkten eine kleine und eine etwas größere kreisrunde Fläche in weißer Farbe erscheint (mit gelben Pfeilen versehen). Bei der größeren handelt es sich um den Pupillen-, bei der kleineren um den Kornreareflex. Zustande kommen diese Reflexe durch das Licht einer Infrarot (IR)-Lichtquelle (Abb.11*b*), die – nachdem sie adjustiert wurde – gezielt auf die Pupille eines Auges strahlt. Die Pupille absorbiert diese Strahlen (im Gegensatz zur Iris, Skleren etc.) und wird in der

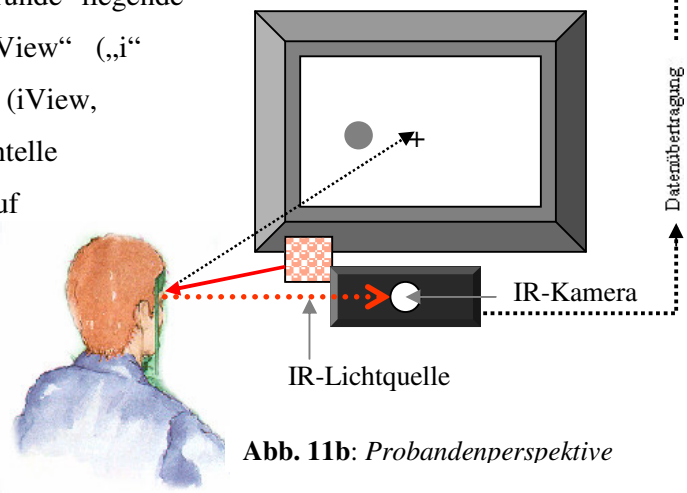


Abb. 11b: *Probandenperspektive*

Abb.11 a und b: *iView®-System; bestehend aus a) Monitor, PC sowie b) Infrarot-Leuchtquelle und Infrarot-Kamera: Der Proband sitzt vor dem Monitor und legt seinen Kopf in eine Vorrichtung, die größere Kopfbewegungen verhindern soll. In diesem Beispiel fixiert er ein Kreuz in der Mitte des Monitors (schwarze gestrichelte Linie), währenddessen in seinem linken Gesichtsfeld eine graue Scheibe (Target) erscheint. Die IR-Kamera zeichnet die reflektieren Pupillendaten auf (rote gestrichelte Linie), die durch das unsichtbare Licht der IR-Quelle (rote durchgezogene Linie) ausgesendet werden, und leitet diese an den Computer weiter (gepunktete schwarze Linie, außen am Bildrand). Der Proband bemerkt weder etwas von dem IR-Licht noch von der weiteren Pupillenaufzeichnung.*

Folge auch nicht im Detail auf die IR-Kamera zurückgespiegelt, wodurch sie auf dem Monitor nur im Umriss bzw. als weiße Fläche erkennbar ist. Der Kornearefl ex hingegen ist der, den die Hornhaut durch ihre leicht konvexe Oberfläche entstehen lässt. Das Software-Programm liefert nun alle 20 ms (50 Hz) für beide Reflexe je ein Koordinatenpaar (x- und y-Wert), die dem Untersucher nach dem Experiment in Form eines ASCII-files zur Verfügung stehen. Zusätzlich kann aber schon über ein Zusatzfenster *während* der Aufnahme kontrolliert werden, ob der Proband tatsächlich fixiert und ob die Pupillen- und Kornearefl exe artefaktfrei aufgezeichnet werden. Dies gibt dem Untersucher die Möglichkeit, bei Unregelmäßigkeiten in der Fixierung bzw. technischen Schwierigkeiten direkt einzugreifen, wodurch insgesamt der Einfluss von Störvariablen vermindert wird. Die nun erhobenen Rohdaten können nach dem Experiment aufbereitet, grafisch dargestellt und statistisch analysiert werden.

Das Koordinatenpaar des Kornearefl exes dient dabei zur Kontrolle der Augenbewegung, denn dieser Reflex wird aufgrund der Wölbung der Kornea in einem unterschiedlichen Winkel auf die IR-Kamera zurückgespiegelt; die x – Koordinate gibt dabei horizontale, die y-Koordinate vertikale Blickverschiebungen an. Um diese Koordinaten richtig auswerten zu können, muss vor jeder Messung eine sog. **Kalibration** („Eichung“) durchgeführt werden. Die Instruktion an den Probanden lautet hierbei, kreisrunde Targets, die nacheinander an verschiedenen Positionen in der Nähe des Bildschirmrandes dargeboten werden, zu fixieren: Bei einer 9-Punkt-Kalibration sind es sukzessive neun Targets, bei einer 5-Punkt-Kalibration fünf, die an den vier Ecken und im Mittelpunkt des Monitors – im Falle der 9-Punkt-Kalibration zusätzlich an den 12 Uhr, 15 Uhr, 18 Uhr und 21 Uhr-Positionen, - dargeboten werden. Das System akzeptiert die Eichung eines Punktes, sobald die x- und y-Koordinaten des Kornearefl exes relativ konstant sind, wobei sich das Toleranzniveau für die Akzeptanz auch manuell einstellen lässt. Da immer nur *ein* Target zu einem Zeitpunkt präsentiert wird und der Blick ohne Fixationsobjekt nicht ohne weiteres stabil und ruhig auf einer Fläche ruhen kann, schlussfolgert das System aus einem relativ stabilen Koordinatenpaar, dass der Proband tatsächlich dieses Target anvisiert: Das dazugehörige x-und y-Koordinatenpaar wird sogleich gespeichert. Daraufhin erscheint dasselbe Target an einer anderen Position, auf die der Proband als nächstes schauen soll: Auch hier muss der Blick ruhen, bevor das Target an einer anderen Stelle erscheint. Nach fünf bzw. neun Targetpositionen und erfolgreicher Speicherung ist die Kalibration beendet und das Computerprogramm kann nun mit diesen Referenzdaten berechnen, wo der Proband zu jedem Zeitpunkt des Experimentes hinsieht. Da

die kürzesten Blicklatenzen (Express-Sakkaden) mindestens 80 ms betragen, kann mit einer Abtastrate von 50 Hertz die Fixierung sicher gestellt werden[19].

Die **räumliche Auflösung** des Systems berechnet sich wie folgt: Die hiesige Einstellung beträgt 453 Pixel in der Horizontalen, die auf einer 40 cm breiten Bildschirmoberfläche gleichmäßig verteilt sind. Nach Umrechnung mithilfe des Strahlensatzes[20] ergibt sich aus der Entfernung von 68 cm zum Bildschirm eine Monitoroberfläche von 30,5° Sehwinkel, d.h. ca. 15 Pixel stellen 1° Sehwinkel (453/30,5) dar; dies ergibt nach weiterer Umrechnung ca. 4 Bogenminuten pro Pixel (60 Bogenminuten / 15 Pixel). Da die Stimuli bei den Patienten mindestens 3° Sehwinkel, also 180 Bogenminuten jenseits der Gesichtsfeldgrenzen präsentiert wurden, kann mit größter Wahrscheinlichkeit – von technischem Versagen mal abgesehen – davon ausgegangen werden, dass eine beabsichtigte Stimulation im klinisch blinden Feld auch tatsächlich dort erfolgte.

Kommen wir nun zu den Pupillendaten, die das System mitliefert: Hierbei wird neben einem Zeitstring, mit dessen Hilfe der Verlauf der Pupillenreaktion innerhalb eines Trials beurteilt werden kann, der horizontale und vertikale Durchmesser derjenigen Fläche aufgezeichnet, die nicht reflektiert wird bzw. in weiß auf dem Monitor erscheint. Genau diese Strecke wird von dem iView®-System in Video-Pixel aufgezeichnet und muss folglich durch 32 dividiert werden, um die tatsächliche Pixelanzahl, die diese Strecke ausmacht, zu ermitteln. Anhand der Zu- oder Abnahme dieser Pixelanzahl kann nun berechnet werden, ob und in welchem Maße sich die Pupillenweite (wiederum im 20-Millisekunden-Takt) verändert hat.[21] Interessiert sich der Untersucher zusätzlich für den absoluten Durchmesser der Pupille (in Millimeter*)*, so muss er – nachdem er das Auge auf seinem Monitor herangezoomt hat – eine kreisrunde Fläche zu Hilfe nehmen, von der er weiß, dass diese einen bestimmten Durchmesser hat (z.B. ein Klebepunkte mit 5 mm Durchmesser). Ein solcher Punkt wird nun auf das geschlossene Oberlid des Probanden befestigt, vom iView®-System (in Pixel) für einige Sekunden gemessen und dann wieder vom Lid entfernt. Mittels Dreisatzrechnung können nun die im Experiment ermittelten Pixelwerte in Millimeter umgerechnet werden.[22]

[19] Diese Fixationskontrolle ist für die nachfolgenden Experimente von großer Wichtigkeit, da sie sicherstellt, dass die visuell dargebotenen Stimuli auch tatsächlich im blinden Feld bzw. lateralisiert präsentiert wurden.

[20] Formel: 1/tan = Stimulusgröße/Stimulusentfernung; hier: 1/tan=40 cm / 68 cm = 30,5 (aufgerundet)

[21] Vorausgesetzt wird hierbei, dass der Proband nicht geblinzelt hat und auch andere Reflexirritationen nicht aufgetreten sind. Die Rohdatenbehandlung wird weiter unten genauer beschrieben.

[22] Diese Methode ist nur ein Not-Behelf, da das iView®-System die absolute Größenmessung der Pupille nicht vorsieht. Zu beachten ist, dass *während* des Experiments der Zoom-Faktor nicht verändert werden darf, da sonst automatisch die Pixelzahl des Durchmessers verändert wird.

4.3.3 PC: Hard- und Software

Da die Aufzeichnung der Pupillendaten viel Speicherkapazität in Anspruch nimmt, wurden die Reize von einem gesonderten Personal Computer (PC) gesteuert: Dabei handelte es sich um einen Pentium II (Highscreen®; Vobis), der mit einem 450 MHz-Prozessor ausgestattet war. Die Bildwiederholungsfrequenz lag bei 85Hz, so dass ca. alle 12 ms (1000ms / 85 Hz) ein neues Monitorbild aufgebaut wurde. Als Software wurde SUPERLAB PRO® (Version 2.0; Groningen, Netherland) oder PRESENTATION® (Version 5.5; Neurobehavioral Systems) verwendet. Dargeboten wurden die Experimente über einen 19-Zoll-Monitor der Firma PHILIPS (Modell. No. 201P10), der in 68 cm Entfernung zur Kinnstütze aufgestellt war. Ausgewertet wurden die Experimente mit dem Statistiksoftware-Paket SPSS® (Version 11.0) sowie der Tabellenkalkulationssoftware EXCEL® (Microsoft Office, 2000).

4.4 Pupillometrische Parameter

In Abbildung 12 sehen wir Pupillenreaktionen innerhalb eines Trials: die Pupille zeigt zunächst keine Reaktion (L; *Latenz*) auf die Darbietung eines *Stimulus* (S). Dann zeigt sich eine Dilatation, die zum Zeitpunkt tG ihren *Gipfel* (G), das heißt, ihre maximale Amplitude erreicht. Die Zeit, die benötigt wird, um die Hälfte der *Gipfelamplitude* zu erreichen wird als *Halbwertzeit des Anstiegs* (t 1/2 an) bezeichnet, das Pendant des Abstiegs als *Halbwertzeit des Abstiegs* (t 1/2 ab). Analog dazu bezeichnet „t 1/10“ die *Zehntelwertzeit*.

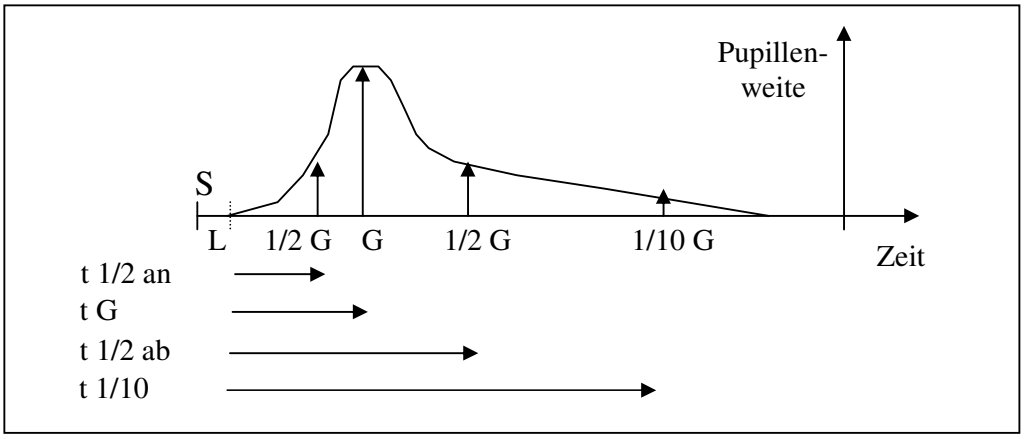


Abb. 12: *Pupillenreaktionen auf einen Stimulus; die Zeiten t 1/2 an, tG,, t1/2 ab und t 1/10 beziehen sich auf den Beginn der Pupillenreaktion (siehe Text)*

Schauen wir nun auf die Pupillenreaktionen des SPE, hat sich insbesondere die Amplitudenhöhe nach einer Stimulusdarbietung als adäquater Parameter herauskristallisiert (Hakarem & Sutton, 1966; Kahneman & Beatty, 1966; Kahneman, 1973; Friedman et al.,

1971, Beatty, 1982; Qiyuan et al., 1985, vgl. Beatty & Luzero-Wagoner, 2000). Einschlägige Studien zum SPE haben wiederholt zeigen können, dass Dilatationen auf selten dargebotene Reize (SPE) nach ca. 300 bis 500 ms beginnen und bei ca. 700 bis 1000 ms ihr Maximum finden, um dann allmählich abzufallen. Von untergeordnetem Interesse ist dabei die Gipfelzeit, die zwar auch mit der Wahrscheinlichkeit des Reizes korreliert, aber in Abhängigkeit zur Gipfelamplitude steht: Je höher letztere ist, desto später ist die Gipfelzeit, weswegen dieser Parameter hier nicht berücksichtigt wurde.

Es bleibt abschließend festzuhalten, dass die Amplitudenmessung den vorangegangenen Studien zufolge das sensitivste Maß für den SPE ist, weswegen dies auch in dieser pupillometrischen Studie als abhängige Variable herangezogen wird.

4.5 Auswertung der psychophysischen und pupillometrischen Daten

4.5.1 Pupillometrische Datensammlung, - filterung und - analyse

Alle Pupillendaten wurden auf einem gesonderten iView-PC in einem ASCII-Ordner gespeichert und standen - wie in den Tabellen 6*a* und 6*b* verkürzt dargestellt - dem Untersucher als Rohdatensatz numerisch zur Verfügung. Dieser Rohdatensatz lag im „dat"-Format vor und konnte in das Statistikprogramm SPSS® eingelesen, vorverarbeitet und ausgewertet werden. Im Header (Tab. 6*a*) dieser Datei waren wie folgt aufgelistet: die Initialen der Vp (in diesem Beispiel: AP), das Datum der Aufnahme (12.5.2003), der Name des experimentellen Skriptes (Happy-sad Skript 1), die absolute Anzahl der Messzeitpunkte (22205), die Pixelanzahl der Kalibrationfläche (453 horizontal, 320 vertikal) sowie die zeitliche Auflösung (50 Hz). Mit Spalte 1 von Tabelle 6*b* beginnend sehen wir, dass der „Counter" bei 0 beginnt und bei 22204 endet: Die letztgenannte Zahl beträgt die Anzahl der Messzeitpunkte, d.h. dieser hier dargestellte Durchgang dauerte von Messbeginn bis - ende ca. 7,4 Minuten.[23] In der Spalte „Time" ist der Zeitverlauf pro Trial notiert: Wir erkennen zunächst die 20ms-Sprünge aufgrund der zeitlichen Auflösung von 50 Hz. Bei genauerem Hinsehen bemerken wir aber auch Zeitangaben, die von den 20-Schritten

Tab. 6 *a*: *Header ASCII-Ordner*

Subject:	AP	
Date:	12.05.03	
Description:	Happy-sad Skript 1	
# of Pts Recorded:	22205	
Size Of Calibration Area:	453	320
Sample Rate:	50	

[23] Rechnung: 22204 x 20 ms = 444080 ms = 444,08 Sekunden / 60 Sekunden ~ 7,4 Minuten.

abweichen (z.B. die ms-Angabe von 12783): Hierbei handelt es sich um geringfügige Verschiebungen, die durch auf- bzw. abrunden in 20ms-Einheiten überführt wurden.[24]

Tab. 6*b*: *Ausschnitt eines ASCII-files mit pupillometrischen Daten (Erläuterungen siehe Text)*

Counter	Time	Set	ScreenH	ScreenV	Diam H	Diam V
0	0	0	235	147	3968	3712
1	20	0	236	146	3968	3712
2	40	0	235	147	3968	3712
3	60	0	233	147	3968	3712
...	...	...	...	...	...	...
639	12783	0	220	128	2784	2496
640	12803	0	244	138	2784	2464
641	12823	0	0	0	0	0
642	12843	0	0	0	0	0
643	0	1	0	0	0	0
644	20	1	0	0	0	0
645	39	1	0	0	0	0
646	60	1	0	0	0	0
647	80	1	0	0	0	0
648	100	1	0	0	0	0
649	120	1	0	0	0	0
650	140	1	0	0	0	0
651	160	1	144	123	2752	2432
652	180	1	236	137	2752	2400
653	200	1	235	133	2752	2432
654	220	1	234	133	2720	2432
655	240	1	235	135	2720	2432
...	...	...	...	...	...	...
22204	6861	100	0	0	0	0

Die Zahl in der „Set“-Spalte gibt die Abfolge der Trials wider: Sie beginnt mit Null, weil zuerst das iView©-System gestartet werden muss. Sobald der erste Trial des Experimentes beginnt, wird vom Stimulations-Rechner zu einem festen Zeitpunkt (je nach Experiment 500 bzw. 1000 ms) vor der Stimulusdarbietung ein akustischer Trigger gesetzt, der die Set-Nr. um einen Zähler erhöht. Mit der neuen Set-Nr. beginnt die Zählung in Spalte „Time“ neu. Anhand der Set-Nr. kann hinterher eingesehen werden, um welche Bedingungen es sich in diesem speziellen Trial gehandelt hat, wodurch letztlich die jeweiligen Pupillendaten der richtigen Bedingung zugeordnet werden können (Erklärungen folgen weiter unten). Die Angaben zur Pupillenweite sind den beiden rechten Spalten zu entnehmen: „DiamH“ gibt die Pixelanzahl in der horizontalen, „DiamV“ die der vertikalen Ebene an. Beachten Sie, dass es sich um Videopixel handelt, d.h. ein Pixel auf dem Monitor entspricht 32 in den Rohdaten. Folglich erscheinen dort nur Zahlen, die ein Vielfaches von 32 sind. Was auffällt sind die vielen

[24] Die Abweichung betrug nie mehr als 3 Zähler und wurde ebenfalls mit SPSS® korrigiert.

Nullen in der Auflistung: Dabei handelt es sich um Blinzler, die mit Blick auf die Auswertung nicht berücksichtigt und deswegen gelöscht wurden. Zusätzlich zu den Nullen wurden flankierende Pupillenwerte ausgeschlossen, die unmittelbar beim Öffnen bzw. Schließen der Augen zu Extremwerten führten. Da der vertikale Durchmesser beim Öffnen und Schließen der Augen eher beeinträchtigt ist als der horizontale, diente der letztgenannte Durchmesser als abhängige Variable für die Pupillenreaktion. An den Zahlen in Spalten „ScreenH“ und „ScreenV“ konnte schließlich ermittelt werden, ob die Vp – zumindest im entscheidenden Moment der Stimulusdarbietung - gut fixiert hat.[25] Ein Beispiel für die Fixationskontrolle ist in Abbildung 13 zu ersehen.

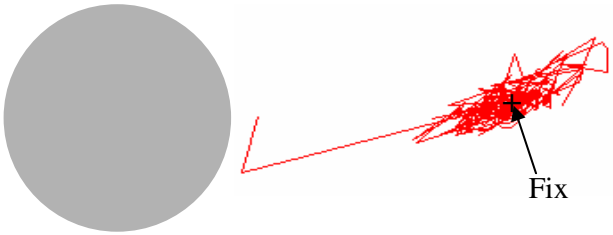


Abb. 13: *Beispiel einer Fixationskontrolle; zu sehen ist links eine graue Scheibe, die für 306 ms im blinden Feld erschien; die Vp wurde instruiert, immer das Fixationskreuz (Fix) zu fixieren. Die Linien stellen die Blickbewegungen während des Trials dar. Im 21. Trial (die Nr. ist hier nicht zu erkennen) blickt der Proband in Richtung des Targets (rote Linie zur grauen Scheibe hin). Dieser Trial wurde bei der Auswertung nicht berücksichtigt. Insgesamt waren solche Sakkaden sehr selten (< 1 %).*

Welche Pupillendaten gingen nicht in die Auswertung mit ein?

Zunächst einmal wurden - wie schon erwähnt - die Blinzler (d.h. Null-Daten) gelöscht, da sie die jeweiligen Mittelwerte konfundiert hätten. Auch die unmittelbar vorausgehenden und nachkommenden Extremwerte wurden gelöscht; ein Beispiel zur Veranschaulichung folgt weiter unten. Ferner waren vereinzelt Reflex-Irritationen zu beobachten: Hierbei sprang der Pupillenreflex (das Fadenkreuz der größeren weißen Scheibe in Abb. 11*a*) auf andere Stellen am Auge wie beispielsweise die Wimpern oder Augenlider. Auch konnte bei Brillenträgern, die ihren Kopf nicht ruhig hielten, der Reflex auf das Brillengestell überspringen. Ferner waren sehr fettige bzw. verschwitzte Hautpartien eine mögliche Ursache für Artefakte. Die Folge war, dass der angezeigte Pupillendurchmesser in die Höhe schnellte (auf mehrere Zentimeter Pupillenweite, was de facto nicht der Realität entsprechen kann) oder aber drastisch abfiel. Da sich die Pupilleweite gewöhnlich nicht so schlagartig verändert, musste es sich dabei um Reflex-Irritationen handeln. Die Grenze zum Ausschluss war überschritten, wenn unmittelbar aufeinander folgende horizontale Pupillenwerte um mehr als 10 % voneinander abwichen. Gewöhnlich waren die Abweichungen der Irritationen um ein

[25] Die Angaben in der Tabelle beziehen sich auf das zu Beginn kalibrierte Feld: Der Fixationspunkt liegt hier bei ca. 235 horizontal und 135 vertikal.

Vielfaches größer als 10 %, so dass die Identifizierung eines Artefaktes i.d.R. kein Problem darstellte. Solche Artefakte konnten dann einige 100 Millisekunden bis Sekunden anhalten, so dass all diese Daten ausgeschlossen werden mussten. Wenn für das entscheidende Intervall eines Trials („Time“ 0 bis 2000 bzw. 2500) mehr als 500 ms artefaktbeladen waren, wurde der gesamte Trial ausgeschlossen. Alle Trials wurden deswegen einzeln mit ihren Rohdaten grafisch dargestellt und inspiziert. Abbildung 14 zeigt zwei solcher Grafiken: Darin ist auf der x-Achse (TIME COR) die Zeit in ms (hier bis ca. 3400 ms) und in der y-Achse (Mittelwert DIAM_H) die Videopixel des horizontalen Durchmessers abgetragen. Es handelt sich in diesem Beispiel um den 20. Trial (set 20, linke Seite), in dem wir eine stetige Zu- bzw. Abnahme beobachten können. Die zweite Graphik (set 25, rechte Seite) zeigt hingegen eine typische Reflex-Irritation gegen Ende des dritten Viertels: Hier fällt der Graph plötzlich um ca. 800 Videopixel ab, um dann gleich wieder in die Nähe des Ausgangswertes zurückzukehren. Diese extremen Pupillenabweichungen wurden dann wie oben beschrieben aus der Datensammlung entfernt. Insgesamt gesehen nahm die Anzahl solcher Irritationen weniger als 5% des Datenpools ein, wobei es hierbei starke individuelle Unterschiede gegeben hat. Um schließlich Pupillenreaktionen sowohl intraindividuell als auch interindividuell vergleichen zu können, wurde - für jeden Durchgang gesondert - eine z-Transformation aller horizontalen und artefaktfreien Pupillendaten durchgeführt.

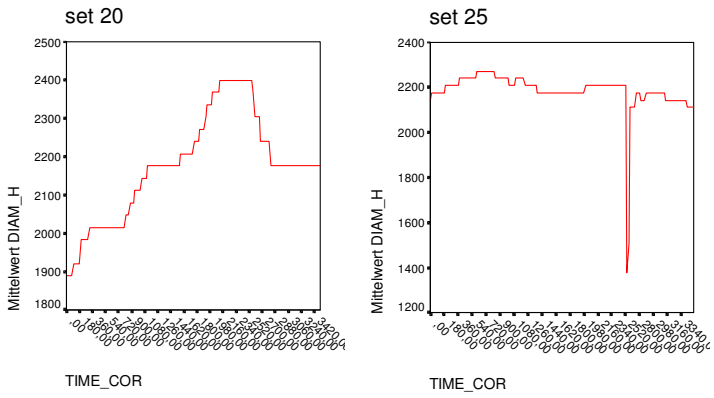


Abb. 14: *Zwei Rohdaten-Grafiken: links ohne, rechts mit Artefakt (Erläuterungen siehe Text)*

4.5.2 Psychophysische Datensammlung, - filterung und - analyse

Wie schon erwähnt wurden die psychophysischen Daten auf einem gesonderten PC gespeichert: Dieser Rechner diente sowohl der Stimuluspräsentation - und enthielt damit die bereits erwähnte Software SUPERLAB PRO® bzw. PRESENTATION® - als auch der Datensammlung. Die gesammelten Daten lagen je nach Software im „dat“- bzw. „log“-Format vor, die ebenfalls in SPSS® eingelesen und analysiert wurden. In die Auswertedatei übernommen wurden hierbei die Reihenfolge und Bezeichnung der dargebotenen Trials sowie

die Antwort und Reaktionszeit der Vp, wobei letztere per Instruktion eine untergeordnete Rolle spielte. In der Psychophysik wurde - mit Ausnahme weniger Trials, die Sakkaden zum Target aufwiesen - keine Antwort ausgeschlossen oder gefiltert.

Welche psychophysischen Antwortmöglichkeiten lagen prinzipiell vor?

Da es sich bei den meisten Experimenten um 2-AFC – Verfahren handelte, ergaben sich aus den beiden Antwort-Alternativen (‚*Target'* vs. ‚*Non-Target'*) vier Antwortkategorien: Treffer und Falscher Alarm für ‚*Target'*-Antworten, Verpasser und Korrekte Zurückweisung für ‚*Non-Target'*-Antworten, je nachdem, ob das Target in dem speziellen Trial dargeboten worden war oder nicht (Tab.7). Daraufhin wurde nun die *Falsch Alarm*-Rate von der *Treffer*-Rate subtrahiert, so dass ein vom Antwortkriterium relativ unabhängiges Sensitivitätsmaß des Probanden ermittelt werden konnte.

Tab. 7: *Vier Antwort-Kategorien aufgrund eines 2-AFC-Experimentes*

	Antwort	
Stimulus	***'Target'***	***'Non-Target'***
Target	Treffer	Verpasser
Non-Target	F. Alarm	Korr. Zurück.

4.5.3 Zusammenfügung psychophysischer und pupillometrischer Daten

Nachdem nun die psychophysischen und pupillometrischen Daten in zwei gesonderten SPSS®-Dateien angelegt und z.T. gefiltert bzw. vorverarbeitet wurden, erfolgte in einem letzten Schritt die Zusammenfügung der Daten: Dazu wurden die pupillometrischen Daten zunächst in 100 ms-„Paketen" gemittelt[26] (je 5), die dann für die ersten 1,5 Sekunden nach Stimulusdarbietung in 15 Spalten aggregiert wurden. Diese aggregierte Datei enthielt nun so viele Zeilen wie die dazugehörige psychophysische Datei, nämlich pro Trial eine Zeile (je nach Experiment 80 bis 240 Trials). Da die „Set"-Zahlen (1,2,3, etc) in der pupillometrischen Datei genau der Reihenfolge der psychophysischen Datei entsprach (1.Trial, 2. Trial, 3. Trial etc), konnten die Variablen der psychophysischen Datei denen der pupillometrischen einfach angehangen werden, so dass die bis dahin noch unbenannten pupillometrischen Zeilen nun über die Benennung der Trials aus der psychophysischen Datei zuzuordnen waren. Da die Trials in letztgenannter Datei den vier erwähnten Antwortkategorien bereits zugeordnet waren, konnten nun auch die Pupillenwerte - gemäß den vier Antwortkategorien - berechnet und graphisch dargestellt werden. Um nun den Verlauf der Pupillenreaktionen unter den Antwortkategorien besser vergleichen zu können, wurde an dieser Stelle eine

[26] Wenn fortan vom Mittelwert gesprochen wird, so handelt es sich immer um den arithmetischen.

Baselinekorrektur[27] durchgeführt, so dass die vier Graphen 500 ms vor Stimulusbeginn in Null (auf der y-Achse) den gleichen Ausgangswert fanden. Die nun baselinekorrigierten Werte wurden in eine neue SPSS®-Datei kopiert, wobei jetzt pro Zeile nicht mehr *ein Trial* (wie zuvor), sondern *eine Vp* repräsentiert war. Diese neue SPSS®-Datei, in die jede Vp eines Experimentes mit einer Zeile vertreten war, wies also nicht mehr nur 15 Variablen für die 100ms-Median-Werte auf, sondern 60, denn die 4 Antwortkategorien waren nun *nebeneinander* angeordnet.

Diese Daten wurden daraufhin erneut gruppiert: Für jede Antwortkategorie und Vp getrennt wurden nun in den Zeitfenstern 351-750 ms (Zeitfenster1 ~ pre-SPE) sowie 751-1150 ms[28] (Zeitfenster 2 ~ SPE) je ein Mittelwert gebildet, die voneinander subtrahiert wurden (Regel: seltenes minus häufiges Ereignis). Die Polarität und Höhe der Differenz stellte schließlich ein Maß für den Zuwachs bzw. die Abnahme der Pupillengröße dar. Der Übersicht halber seien die Auswertungsschritte bezüglich der Pupillendaten in Tabellen 8 und 9 veranschaulicht: Nehmen wir folgendes Experiment an: Ein Proband bekommt die Aufgabe, ein Target, das schwierig zu sehen ist, zu entdecken. Er weiß, dass dieses Target aber nur in 20% der Trials erscheinen wird und soll nach jedem Trial einschätzen, ob das Target vorhanden war oder nicht. Im Zweifel soll er raten (2-AFC). Insgesamt werden ihm 300 Trials präsentiert. Nehmen wir weiter an, das Ergebnis sei wie in Tabelle 8 dargestellt ausgefallen: Wir ermitteln die *Treffer*-Rate, indem wir die Anzahl der tatsächlichen Treffer durch die Anzahl der möglichen Treffer dividieren; sie beträgt 20% (12/60=0,2). Analog berechnen wir für die *Falsch-Alarm*-Rate ebenfalls 20 % (48/240=0,2). Wir stellen fest, dass dieser Proband auf Rate-Niveau liegt, da die *Treffer*-Rate minus *Falsch-Alarm*-Rate gleich Null ist (20%-20%=0). Psychophysisch läge keine Entdeckungsleitung vor.

Tab. 8: *Fiktives Ergebnis einer 2-AFC-Entdeckungsaufgabe; Erläuterungen siehe Text*

	Antwort		
Stimulus	*'Target'*	*'Non-Target'*	Spalten-summe
Target	12	48	60
Non-Target	48	192	240
Zeilensumme	60	240	300

[27] Die Baselinekorrektur wurde wie folgt durchgeführt: Der Median der ersten drei Datensätze (0, 20 und 40 ms) einer Antwortkategorie wurde durch Addition bzw. Subtraktion auf 0 gesetzt und alle folgenden Mediane dieser Kategorie wurden folglich der gleichen Rechenoperation unterzogen, also mit dem gleichen Wert addiert bzw. subtrahiert. Diese Rechenoperation wurde in EXCEL® (Microsoft Office, 2000) durchgeführt.

[28] Auf die Auswahl der Zeitfenstergrenzen wird noch eingegangen.

Bleiben wir in diesem Beispiel und skizzieren anhand der Ergebnisse die Analyse der pupillometrischen Daten: In Tabelle 9 ist zunächst die zahlenmäßige Aufteilung der Antworten in den ersten beiden Spalten dargestellt. Wir werden nun die Pupillendaten aufbereiten, so dass wir adäquate Maße für eine inferenzstatistische Überprüfung erhalten:

Tab. 9: *SPE-Berechnung innerhalb der vier psychophysischen Antwortkategorien*

Antwort-Kategorie	Zufalls-bedingte Verteilung	Zeit / Trial	Daten / Trial	Med / Trial	Mittelwerte der Zeitfenster	# Differenzen	SPE pro Kategorie
Treffer	12 Trials	12x1500ms	12x75 Daten	12 x 15 Med.	12x2 MW	12xSPE	1 SPE Treffer
F.Alarm	48 Trials	48x1500ms	48x75 Daten	48 x 15 Med.	48x2 MW	48x SPE	1 SPE F.Alarm
Verpasser	48 Trials	48x1500ms	48x75 Daten	48 x 15 Med.	48x2 MW	48x SPE	1 SPE Verpasser
Korr. Zurück.	192 Trials	192x1500ms	192x75 Daten	192 x 15 Med.	192x2 MW	192xSPE	1 SPE Korr. Zurück.

Berechnen wir exemplarisch die Treffer: Die Treffer-Trials, zwölf an der Zahl seien bereits artefaktbereinigt und z-transformiert und werden nun zusammengefügt. Besonders interessant für unsere Fragestellung (SPE) sind dabei die ersten 1500 ms nach Stimulus onset, und für diese Zeitspanne erhalten wir pro Trial 75 horizontale Pupillendurchmesser (50Hz). Diese 75 Daten werden zunächst in 100ms-Pakete gebündelt, so dass nur noch 15 Mittelwerte für jeden der zwölf Trials übrig bleiben. Daraus können wir eine graphische Darstellung konstruieren, die uns einen visuellen Eindruck über den Verlauf der Pupillenweite gibt. Für die statistische Analyse werden nun zwei Zeitfenster-Mittelwerte berechnet, wiederum für jeden der zwölf Trials getrennt; schließlich wird der Mittelwert des häufigen Ereignisses vom Mittelwert des seltenen Ereignisses subtrahiert. Wir erhalten für jeden der zwölf Trials einen Differenzwert; diese werden erneut zu *einem* SPE-Wert pro Antwortkategorie (hier: *Treffer)* gemittelt. Beachten Sie, dass jeder der 12 Zeitfenster-Mittelwerte seinerseits aus ca. 15 bis (maximal) 20 Daten entsteht[29], also ein relativ robuster „Trial-Repräsentant“ für das jeweilige Zeitfenster sein dürfte.

Welche SPE's lassen sich sinnvollerweise vergleichen? Wir haben in dem oben genannten fiktiven Beispiel den SPE für insgesamt 12-Treffer-Trials ermittelt. Mit welcher anderen Antwort-Kategorie dürfen wir diesen Treffer-SPE vergleichen? Für Reaktionszeiten hatten wir bereits den „response probability effect“ kennengelernt: Häufige Antworten erfolgten schneller und akkurater als seltene. Gilt dieser Effekt auch für die Pupille? RICHER et al. (1983) und VAN DER MOLEN (1989) konnten bereits zeigen, dass seltene Antworten mit einer

[29] Der 100ms-Median wurde aus 5 Daten (alle 20 ms ein Datum), der Mittelwert pro 400ms-Zeitfenster aus je 4 100ms-Medianen ermittelt (4x5=20), vorausgesetzt, dass keine Reflex-Irritation o.ä. aufgetreten sind.

stärkeren Pupillenreaktion einhergehen als häufige Antworten. Dies heißt für uns, dass wir den Effekt von *Treffern* nur mit dem von *Falschen Alarmen* vergleichen dürfen, denn beide Kategorien haben gemeinsam, dass der Proband ‚*Target'* geantwortet hat, nur in dem einen Fall wurde das Target dargeboten (Treffer), in dem anderen nicht (Falscher Alarm). Analog verhält es sich mit *Verpassern* und *Korrekten Zurückweisungen*. Wenn nun innerhalb einer Antwort eine unterschiedliche Zeitfenster-Differenz zu ermitteln ist, muss dies bei Konstanthaltung der übrigen Variablen auf die Stimulation bzw. deren Verarbeitung im Nervensystem zurückgehen.

Nach welchen Kriterien wurden die Zeitfenster ausgewählt?

Beginnen wir mit der Begründung für das Zeitfenster 2 (SPE-Zeitfenster), deren Grenzen nach bereits vorliegenden SPE-Studien ausgewählt wurden: Hierzu wurde berichtet, dass der SPE bei 300-500ms beginnt und seinen Höhepunkt bei ca. 700-1000 ms findet (Qiyuan et al., 1985), wobei der Schwerpunkt eher bei 1000 ms nach Stimulus onset liegt (Beatty, 1982). Eigenen Voruntersuchungen zufolge haben sich Pupillenreaktionen tatsächlich ab ca. 500 ms, gelegentlich sogar erst ab 600 bis 700 ms ergeben. Die Maxima lagen hierbei im Mittel bei ca. 950 ms post onset. Um nun auch Maxima sicher erfassen zu können, die etwas vor oder hinter 950 ms auftraten, wurde das Zeitfenster 200 ms vor und 200 ms danach gewählt, nämlich 751-1150 ms post onset. Da Pupillendaten (insbesondere SPE-Daten) aber generell einer erhöhten Rauschanfälligkeit unterliegen, wurde als Maß für den SPE ein Mittelwert für dieses Zeitfenster berechnet, wodurch ein solideres Fundament erlangt wurde (mögliche Artefakte wie z.B. sehr kurze und plötzliche Amplitudenerhöhungen wurden dadurch relativiert). Für die Begründung des referierenden Zeitfensters (pre-SPE: 351-750ms) müssen zwei Dinge angesprochen werden: die Breite des Fensters und die Latenz. Die Breite begründet sich aus der Vorgabe, dass der zu vergleichende Mittelwert möglichst aus einem gleichgroßen Fenster (von 400 ms) bzw. aus einer vergleichbaren Anzahl von einzelnen Pupillendaten ermittelt werden sollte. Dadurch war der mögliche Einfluss von zufällig auftretenden Störvariablen annähernd gleichgehalten. Der Grund für die Latenz liegt darin, dass in manchen Trials bereits nach 200 ms eine (geringfügige) Pupillendilatation einsetzte: Eine solch frühe Dilatation stagnierte oft bis zum SPE-Zeitfenster, um dann nicht selten erneut zuzunehmen. In solchen Trials lag bereits ein „Vorsprung" in der Amplitudenhöhe vor, und da eine so frühe Reaktion vermutlich *nicht* auf einen SPE zurückzuführen ist (Qiyuan et al. 1985, Beatty, 1982), wurden das Zeitfenster unmittelbar vor dem des SPE gewählt, d.h. 351 bis 750 ms post onset. Ob es sich bei den frühen Reaktionen um einen Pupillenlichtreflex gehandelt hat, wird z.T. in den nachfolgenden Experimenten noch erörtert.

5.0 Experimental-Phase A

5.0 Experimental-Phase A: Rindenblinde Patienten

In der Experimental-Phase A wurden rindenblinde Patienten pupillometrisch und psychophysisch untersucht.

5.1 A1: „Empfindungs-Experiment"

Im ersten Experiment, das dargestellt wird (Empfindungs-Experiment), wurden insgesamt acht Patienten untersucht. In Anknüpfung zu den Ausführungen unter Punkt 3.4.2 (Pupillometrie beim Blindsehen) und Punkt 3.4.3 (Stimulus-Probability-Effect) bekamen die Patienten visuelle Reize mit unterschiedlicher Auftretenswahrscheinlichkeit präsentiert: Zur Hälfte der Trials wurde das Target in 20%, zur anderen Hälfte in 80% dargeboten; andernfalls erfolgte ein Leerreiz. Die Aufgabe des Patienten lautete, nach jedem Trial per Tastendruck zu entscheiden, ob das Target oder ein Leerreiz, also kein Target präsentiert worden war. Wurden die Reize im blinden Feld dargeboten, mussten die Patienten raten, welcher der beiden Stimuli dargeboten wurde.

Um die pupillometrischen Ergebnisse der blinden Seite besser interpretieren zu können, wurden die Reize auch im gesunden Feld dargeboten: Interessant ist das letztgenannte Pupillenverhalten deswegen, weil unterschiedliche Vpn nicht in gleichem Ausmaß auf visuelle Stimulationen reagieren.[30]

Alle Patienten wurden nur einäugig untersucht; das Auge, in dem der Gesichtsfeldausfall die nasale Gesichtsfeldhälfte betrifft, wurde mit einer Augenklappe abgedeckt. Der Grund für die monokulare Untersuchung liegt darin, dass gerade Patienten mit einer weit an die Fixationsachse reichenden Blindheit kompensatorisch schielen können, um eine bessere Ausnützung des zentralen Bereiches zu erreichen. Hierbei wurde für die Durchführung der Tests das der lädierten Hirnhälfte gegenüberliegende Auge verwendet, weil postgenikulär bedingte Gesichtsfeldausfälle sich im temporalen Halbfeld oft systematisch kleiner darstellen (Teuber et al., 1960), und der Reiz so im Ausfall positioniert werden sollte, dass die Gesichtsfeldrepräsentation beider Augen sicher betroffen ist.

5.1.1 A1: Hypothesen

Wenn Stimuli supraliminal und im peripheren gesunden Gesichtsfeld präsentiert werden, erzeugen sie einen durch die Stimulus-Auftretenswahrscheinlichkeit bedingten SPE. Luminanzunabhängig ist dieser SPE dann, wenn die seltene Blank-Bedingung (Target in

[30] Aus diesem Grunde wurden ja alle Daten z-transformiert (siehe Punkt 4.5.1)

80%) eine stärkere Dilatation mit sich bringt als die, die nach (häufigen) Target-Darbietungen entsteht. Wenn dieselben Stimuli im *blinden* Feld präsentiert werden, erzeugen sie auch hier unabhängig von der Luminanz einen durch die Auftretenswahrscheinlichkeit der Stimuli abhängigen SPE, der dem der Gesichtfeldstimulation im gesunden Feld ähnelt.

Wenn der pupillometrische Effekt empfindlicher ist als die psychophysisch gemessene Entdeckungsleistung, dann sollte der SPE im blinden Feld auch auftreten, wenn der Patient keine signifikante (psychophysische) Entdeckungsleistung zeigt.

5.1.2 A1: Stichprobe und Untersuchungszeitraum

Das Experiment wurde mit acht Patienten begonnen, wovon sieben männlich und eine Vp weiblich waren. Von diesen acht untersuchten Patienten musste eine Vp (WF, männlich) ausgeschlossen werden, weil er selbst bei Stimulation im gesunden Feld kaum bzw. keine Pupillenreaktionen zeigte.[31] Weitere Angaben zu den Patienten sind unter Punkt 4.2 und im Anhang zu erfahren.

Der Untersuchungszeitraum beschränkt sich auf die Monate März bis November des Kalenderjahres 2003; die Experimente dauerten pro Vp ca. drei bis vier Stunden. Diese Zeit wurde über drei oder vier Sitzungen verteilt. Alle Patienten nahmen freiwillig an diesem Experiment teil.

5.1.3 A1: Versuchsdesign und Trialaufbau

Jeder Patient durchlief mehrere Durchgänge. Innerhalb eines Durchgangs wurden die Stimuli entweder im sehenden oder im blinden Feld präsentiert. Jeder Durchgang bestand aus 100 Trials, der je nach Bedingung entweder 20 % Targets und 80 % Blanks (Target 20%) oder aber 80% Targets und 20 % Blanks (Target 80%) enthielt. Im blinden Feld erhielten die

Tab. 10: *Versuchdesign des „Empfindungs-Experiments"; dargestellt ist die Anzahl der Trials, die pro Bedingung absolviert wurden, wobei jeder Durchgang aus 100 Trials aufgebaut war.*

	Target in 20%	**Target in 80%**	**Trials insgesamt**
Gesundes Feld	160 Blank / 40 Target	40 Blank / 160 Target	400 (4x100)
Blindes Feld mit Info	240 Blank / 60 Target	60 Blank / 240 Target	600 (6x100)
Blindes Feld ohne Info	240 Blank / 60 Target	60 Blank / 240 Target	600 (6x100)

[31] Der Grund für diesen Ausschluss liegt darin, dass in dieser Arbeit die Pupillenreaktionen und ihre Korrespondenz zur Psychophysik im Zentrum standen. Die 2-AFC-Ergebnisse dieses Probanden waren für die Target-20%-Bedingung nicht signifikant.

Probanden insgesamt 300 Trials *ohne* und 300 Trials *mit* der Information zum dargebotenen Target-Blank-Verhältnis. Im gesunden Feld erübrigte sich diese Information, da die Patienten ja hier selbst sehen konnten, in welchem Verhältnis die Stimuli präsentiert wurden. Um die zur Verfügung stehende Untersuchungszeit mit den Patienten für die Fragestellung bestmöglich zu nutzen, erhielten die Vpn im gesunden Feld weniger Trials. Inwiefern dieses ungleiche Verhältnis einen Einfluss auf die Ergebnisse gehabt haben mag, wird noch diskutiert. Tabelle 10 zeigt die Anzahl der absoluten Trialdarbietungen, die jeder Patient durchlaufen hat. Dabei wurde darauf geachtet, dass Durchgänge innerhalb einer Target-Bedingung (z.B. Target 20%) immer zusammenhängend präsentiert wurden, so dass der Proband bzw. dessen Nervensystem sich auf die Häufigkeit der Targets – bewusst oder unbewusst - „einstellen" konnte. Die Dauer eines Durchgangs betrug fünf bis sieben Minuten, danach konnte der Patient pausieren. In Durchgängen *mit* Verhältnis-Informationen wechselten die Durchgänge von der blinden zur gesunden Seite ab, so dass z.B. ein Target-20%-Durchgang zuerst auf der blinden, dann auf der gesunden, dann wieder blinden Seite etc. durchgeführt wurde. Dadurch wurden Übungs- oder Aufmerksamkeitsfaktoren ausbalanciert, so dass die Pupillenreaktionen des gesunden Feldes mit denen des blinden verglichen werden konnten. In den Durchgängen ohne Information zum Verhältnis wurden nach Zufall entweder zuerst die Target-80%- oder Target-20%-Durchgänge durchgeführt.

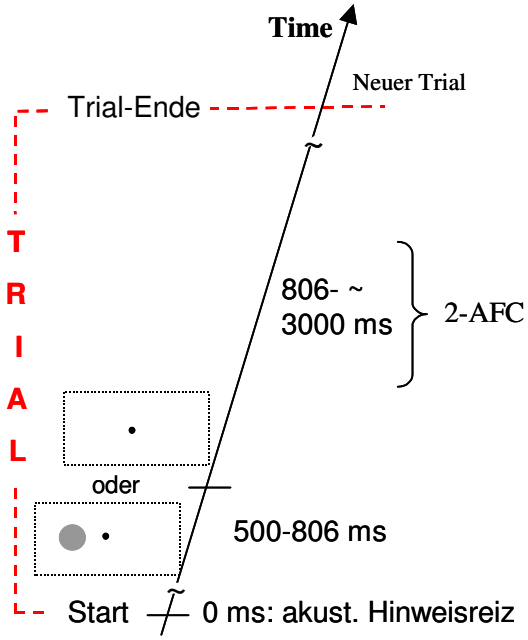


Abb. 15: *Trialaufbau des „Empfindungs-Experiments"; siehe Text.*

Alle Trials hatten den gleichen Aufbau: Sie begannen mit einem akustischen Hinweisreiz (500 Hz; ~40 dB), der in zweierlei Hinsicht von Bedeutung war: Erstens bereitete er die Vp vor, dass in Kürze, nämlich in 500 ms der zu diskriminierende Reiz erscheinen würde; zweitens stellte dieser Hinweisreiz das Trigger-Signal dar, durch das die iView®-Software die „Set"-Nr. um einen Zähler erhöhte und den Zeitverlauf in der Spalte „Time" bei Null beginnen ließ (siehe Punkt 4.5.1).

500 ms nach dem Tonsignal erschien für

306 ms[32] ein Stimulus, entweder Target oder Blank. Nach dessen Verschwinden, 806 ms nach dem Tonsignal, sollte der Patient möglichst spontan per Tastendruck entscheiden, ob die graue Scheibe da war oder nicht (2-AFC). Die Antwort triggerte den nächsten Trial, der 750 bis 1250 ms später begann. Abbildung 15 zeigt exemplarisch die Untersuchung des linken Gesichtsfeldes (graue Scheibe liegt links vom Fixationspunkt). Um Pupillenreaktionen aus dem gesunden Feld mit denen aus dem blinden Feld vergleichen zu können, wurde auch für die Stimulation im gesunden Feld um eine relativ spontane, aber keine auf Schnelligkeit abgestellte Antwort (Tastendruck) gebeten.[33]

In Abbildung 16 ist die Target-Darbietung im blinden Feld eines Patienten angedeutet (schraffierte Fläche): Die Hintergrund- und Target-Luminanzen betrugen 77 bzw. 19 cd/m², was einen log-Kontrast von 0,61 ausmacht.[34] Die Lokation des Targets im blinden Feld richtete sich nach dem individuellen Gesichtsfeldausfall (siehe Tab. 4 unter Punkt 4.2) und wurde so gewählt, dass die graue Scheibe deutlich in das blinde Feld hineinfiel, wobei der zum normalen Gesichtsfeld gerichtete Targetrand mindestens 5° Sehwinkel von dessen Grenze entfernt war. Für die Untersuchung des gesunden Gesichtsfeldes wurde die achsensymmetrische Position im normalen Halbfeld verwendet. Die Trials innerhalb eines Durchgangs waren pseudo-randomisiert, wobei jeder Durchgang eine unterschiedliche Pseudorandomisierung aufwies.

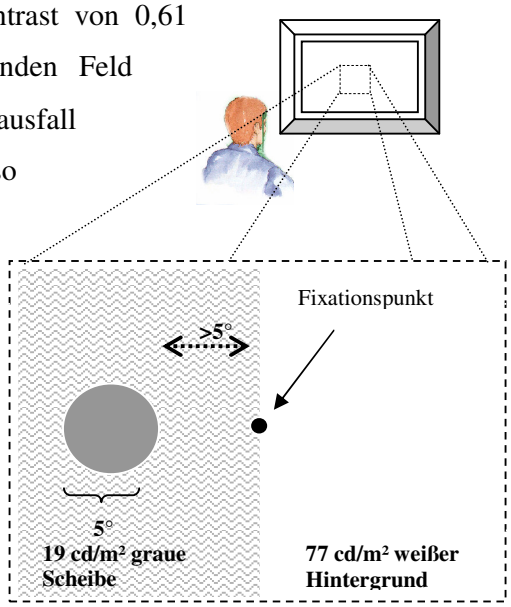


Abb. 16: *Angaben zur Luminanz, Lokation und Größe des Targets, das hier in das linke und blinde Halbfeld (symbolisch schraffiert dargestellt) projiziert wurde.*

[32] Die Bildwiederholungsrate des Monitors betrug in diesem Experiment 85 Hz, d.h. in einer Sekunde wurde 85 Mal ein neues Bild (Frame) aufgebaut, deren Darbietungszeit ca. 11,8 ms betrug (1000ms/85Hz) . Ein Stimulus konnte nur ein Vielfaches einer solchen Frame-Zeit betragen. Da die Software auf 300 ms Stimulusdarbietung programmiert war, endete das Bild nach 26 Frames, also ca. 306 ms.

[33] Dem Patienten wurde zuvor erklärt, dass es sich dabei um die Erhebung pupillometrischer Vergleichsdaten handelt, die benötigt werden, um evt. auftretende Pupillenreaktionen im blinden Feld besser interpretieren zu können. Es versteht sich von selbst, dass die Bearbeitung dieser Durchgänge keiner anspruchsvollen oder anstrengenden Tätigkeit entsprach.

[34] Log (77cd/m²) – Log (19 cd/m²) = 0,61

5.1.4 A1: Versuchsdurchführung und Vp-Instruktion

Alle hier untersuchten Patienten waren mit Blindseh-Experimenten aufgrund vorausgegangener Studien vertraut. Die Instruktion an die Patienten wurde mündlich gegeben und ähnelte der von anderen Experimenten: Die Aufgabe war herauszufinden, in welchen Trials die graue Scheibe dargeboten wurde und in welchen nicht. Da das Target gewöhnlich im *blinden* Feld erschien, sollten sie ihrer „Empfindung" nach antworten („Empfindungs-Experiment"). In Durchgängen *mit* Information zum Target-Blank-Verhältnis wurden sie instruiert, sich ungefähr an dieses Verhältnis zu halten (z.B. bei Target-20%-Durchgängen von den 100 Trials in etwa 20 Mal Target und 80 Mal Blank zu antworten), in Durchgängen *ohne* diese Information wussten die Patienten nur, dass überhaupt Targets erschienen, die Häufigkeit jedoch nicht.

Zu Beginn des Experiments wurde eine 9-Punkt-Kalibration durchgeführt (siehe Punkt 4.3.2). Dann begann eine Übungsphase, in der die Stimuli im gesunden Feld erschienen, so dass die Patienten ein Gefühl für einen Trialablauf, die Zeit von Hinweisreiz bis zum Target und die Betätigung der Antworttasten bekamen. Die Reaktionszeit spielte keine Rolle, es wurde aber um relativ spontane Antworten gebeten. Alle Patienten waren Rechtshänder und antworteten mit ihrer rechten Hand. Die linke Taste entsprach der Antwort ‚*Target'*", die rechte der Antwort ‚*Blank'*. Die Beleuchtung im Untersuchungsraum betrug 0,5-1,5 cd/m². Alle teilnehmenden Patienten wurden in diesem Experiment ausschließlich vom Autor dieser Schrift (C.L.) instruiert und begleitet.

Neben der bereits erwähnten Soft- und Hardware wurde zusätzlich die Software PRESENTATION (Version 5.5) eingesetzt.

5.1.5 A1: Ergebnisse

Weder psychophysisch noch pupillometrisch ergaben sich wesentliche Unterschiede zwischen den Durchgängen mit und ohne Information zum Target-Blank-Verhältnis, weswegen diese Daten zusammengefasst wurden (600 Trials in der Target-20% und 600 Trials in der Target-80%-Bedingung im blinden Feld).

Alle Probanden gaben glaubhaft zu verstehen, im blinden Feld keinerlei visuelle Wahrnehmung gehabt zu haben; die Antworten (‚*Target'* oder ‚*Blank'*), die sie gaben, beruhten auf „willkürlichem Raten" (KHE) bis hin zu „kleinsten Empfindungen" (HK), die jedoch als „weit entfernt" von visueller Bewusstheit beschrieben wurden. Es stellt sich darum zunächst die Frage, wie gut die Patienten zu „raten" bzw. zu „empfinden" vermochten. Im Anschluss werden die Pupillendaten direkt unter Berücksichtigung der psychophysischen Antwortkategorien dargestellt.

5.1.6 A1: Psychophysik

Nachfolgend werden in tabellarischer Form (Tab. 11) zeilenweise die 2-AFC-Ergebnisse der sieben Patienten vorgestellt, wobei spaltenweise die absolute Anzahl der *Treffer*, *Falschen Alarme, Verpasser* und *Korrekten Zurückweisungen* aufgelistet ist. Hinter den absoluten Zahlen befindet sich zusätzlich die jeweiligen Raten, die ermittelt wurde über die Berechnung

Tab. 11: *2-AFC Ergebnisse vom „Empfindungs-Experiment" bei n=7 Patienten; siehe Text*

Target 20	Treffer	F. Alarm	Verpasser	Korr. Zurückw.	Summe	p-Wert
BF	45 (37,5%)	141 (29,4%)	75 (62,5%)	339 (70,6%)	T:120; B:480	< 0,085
DH*	26 (43,3%)	41 (17,1%)	34 (56,7%)	199 (82,9%)	T: 60 ; B:240	< 0,000
FS	37 (30,6%)	157 (32,8%)	84 (69,4%)	322 (67,2%)	T:120; B:480	< 0,644
HH	52 (43,3%)	186 (38,8%)	68 (56,7%)	294 (61,3%)	T:120; B:480	< 0,359
HK	100 (83,3%)	44 (9,2%)	20 (16,7%)	436 (90,8%)	T:120; B:480	< 0,000
KHE*	21 (17,1%)	66 (13,8%)	102 (82,9%)	411 (86,2%)	T:123; B:477	< 0,363
MS	40 (33,3%)	131 (27,3%)	80 (66,7%)	349 (72,7%)	T:120; B:480	< 0,190
Target 80	Treffer	F. Alarm	Verpasser	Korr. Zurückw.	Summe	p-Wert
BF	352 (73,3%)	97 (80,8%)	128 (26,7%)	23 (19,2%)	T:480; B:120	< 0,090
DH*	194 (80,8%)	24 (40,0%)	46 (19,2%)	36 (60%)	T:240; B: 60	< 0,000
FS	310 (64,6%)	69 (57,5%)	170 (35,4%)	51 (42,5%)	T:480; B:120	< 0,150
HH	182 (37,9%)	43 (35,8%)	298 (62,1%)	77 (64,2%)	T:480; B:120	< 0,673
HK	339 (70,6%)	17 (14,2%)	141 (29,4%)	103 (85,8%)	T:480; B:120	< 0,000
KHE	187 (39,0%)	47 (39,2%)	293 (61,0%)	73 (60,8%)	T:480; B:120	< 0,967
MS	361 (75,2%)	81 (67,5%)	119 (24,8%)	39 (32,5%)	T:480; B:120	< 0,090

* Aufgrund terminlicher oder technischer Probleme liegt eine reduzierte oder im Verhältnis leicht veränderte Trialanzahl vor.

der absoluten Anzahl dividiert durch die Spaltensumme (siehe Punkt 4.5.2). In der vorletzten Spalte ist die Anzahl aller präsentierten Target (T)- und Blank (B)- Trials aufgeführt. Zuletzt kommt der p-Wert der 4-Felder-Chi-Quadrat-Berechnung, der zweiseitig angegeben ist. Das Verhältnis zwischen Treffern und Falschen Alarmen gibt Auskunft über die Entdeckungsleistung; die Differenz ist in Abb. 17 aufgetragen. Hier ebenso wie in den p-Werten aus Tabelle 11 zeigt sich, dass nur zwei der sieben Patienten eine signifikante Leistung erzielen konnten (DH; HK); die übrigen befinden sich auf Rateniveau.

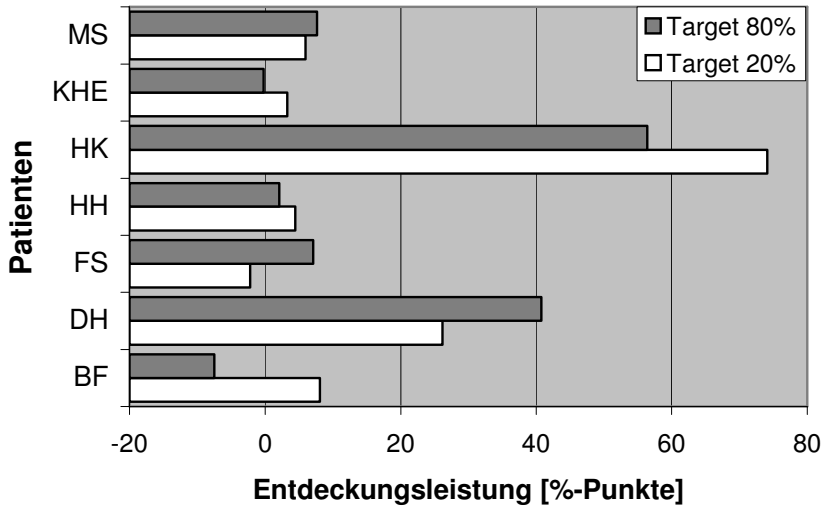


Abb. 17: *Entdeckungsleistung (Treffer – minus Falsch-Alarmrate) für Target 20% (weiße Balken) - und Target 80%-Durchgänge (dunkle Balken); siehe Text*

5.1.7 A1: Pupillometrie und Korrespondenz zur Psychophysik

Zunächst werden die Ergebnisse der gesunden Seite besprochen; Abbildung 18 zeigt den Verlauf der Pupillenweite nach Stimulus onset für jeden Patienten einzeln dar.

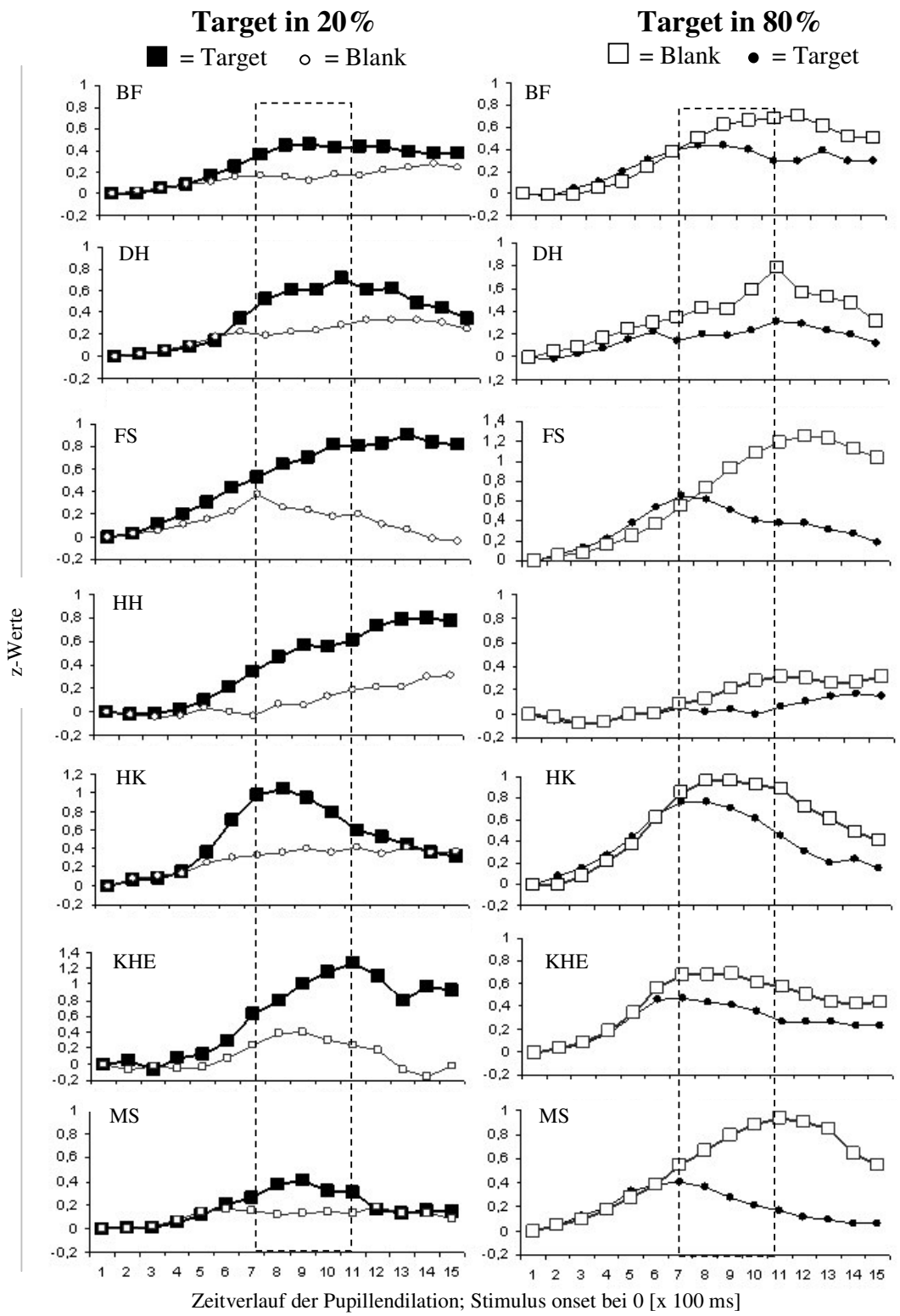


Abb. 18: *Gesundes Feld: Patienten wurden im intakten Feld für 306 ms stimuliert; große Symbole zeigen das seltene, kleine das häufige Ereignis; zusätzlich weisen schwarz ausgefüllte Symbole auf eine Target-, weiß ausgefüllte auf eine Blank-Präsentation hin;. Das Resultat zeigt, dass in der 20%-Bedingung (linksseitige Abbildungen) die seltene Target-Darbietung mehr Dilatation als die häufige Blank-Darbietung macht. In der rechten Spalte zeigt sich das gegenteilige Bild: Hier gehen die (seltenen) Blank-Darbietungen mit stärkeren Dilatationen einher (SPE-Zeitfenster von 751-1150 ms ist gestrichelt dargestellt).*

Abb. 18 lässt auch einen Blick auf die frühen Pupillenreaktionen zu: Hier zeigt sich, dass eine Target-Darbietung, die de facto eine Verdunkelung darstellt, in der Regel nicht mit einer Dilatation in den ersten 300–500 ms post stimulus onset einhergeht. Die stärksten Pupillenantworten scheinen sich dagegen zwischen 500 und 1100 ms post onset abzuspielen.
Abbildung 19 zeigt in einem Säulendiagramm die gemittelte Pupillendilatation von Target- und Blank-Trials in dem SPE-Zeitfenster verglichen zur Baseline (stimulus onset): Alle Vpn zeigten im Mann-Whitney-U-Test (MW-U-Test) einen hochsignifikanten Effekt ($p<.01$).

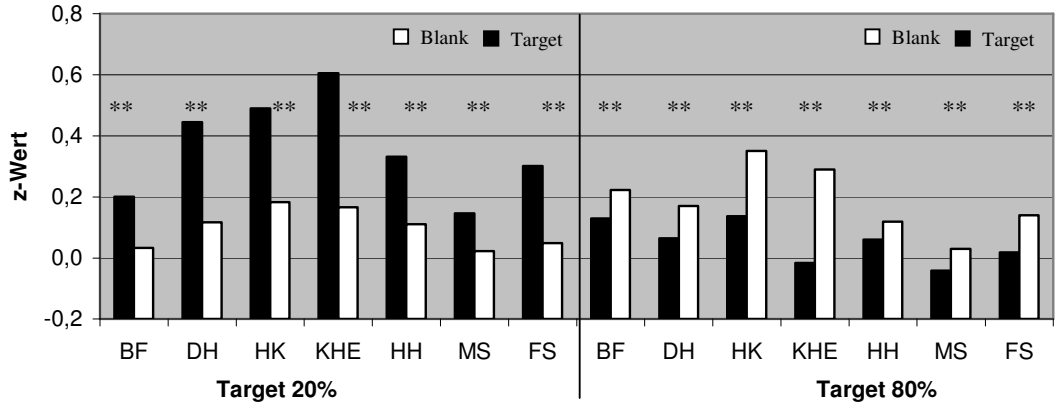


Abb. 19: *Gesundes Feld: Pupillendilatationen in Abhängigkeit der Target-Wahrscheinlichkeit; linke Seite: Target (in 20%) entspricht dem seltenen Ereignis; rechte Seite: Target in 80 % entspricht dem häufigen Ereignis; ** p<.01 im MW-U-Test.*

Da Pupillenreaktionen, die simultan zu psychophysischen Antworten aufgenommen werden, auch von der Antwort des Probanden abhängen („*response* probability effect", siehe 4.5.3), wird die Auswertung nachfolgend immer nur *innerhalb* eines Antwort-Typs (‚*Target'* oder ‚*Blank'*) vorgenommen.

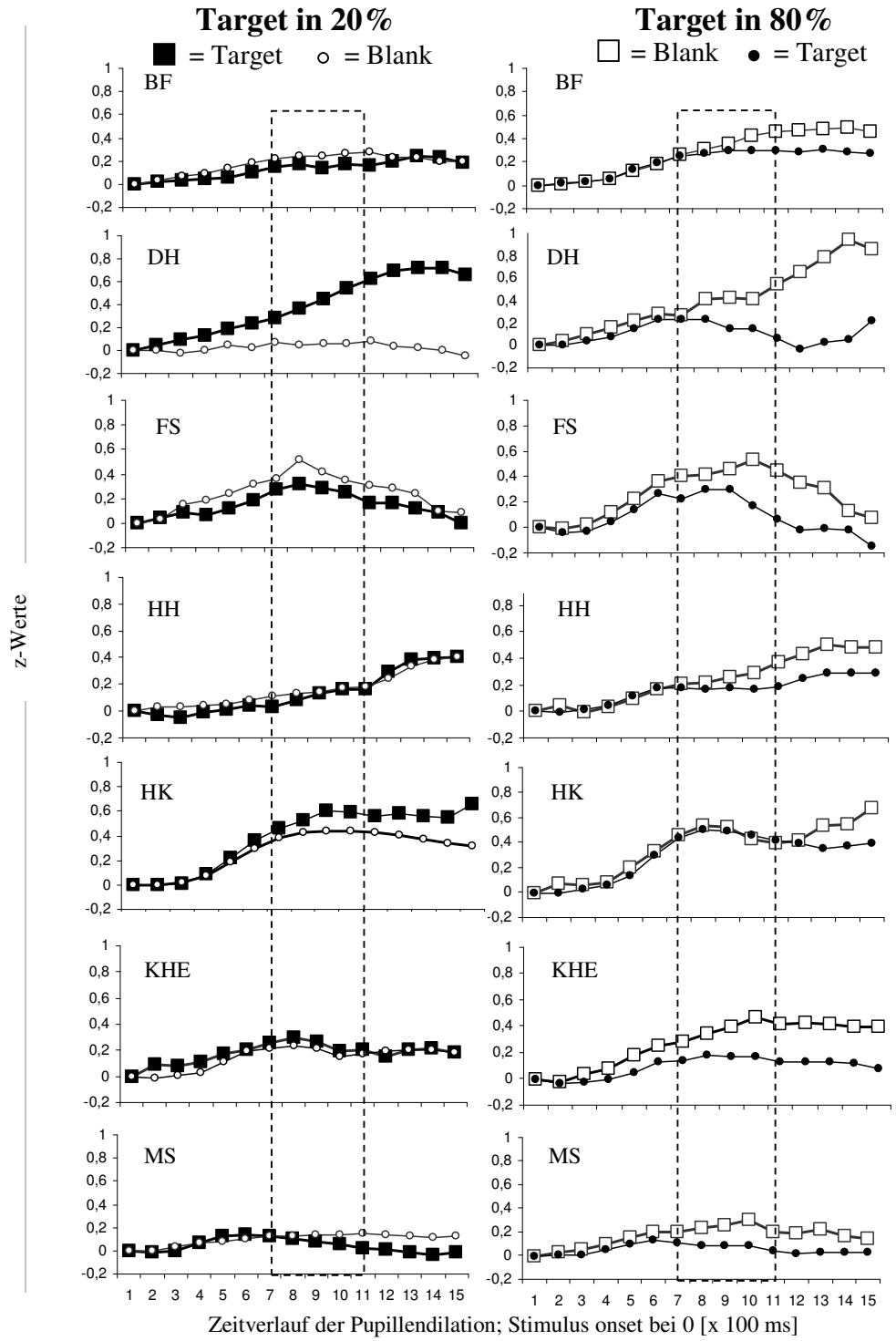


Abb. 20. *Blindes Feld: Patienten wurden im blinden Feld für 306 ms stimuliert; große Symbole zeigen das seltene, kleine das häufige Ereignis; zusätzlich weisen schwarz ausgefüllte Symbole auf eine Target-, weiß ausgefüllte auf eine Blank-Präsentation hin. Dargestellt sind hier nur die Pupillenreaktionen der häufigeren Antworten, d.h. in der Target-20%-Bedingung die ‚Blank'-Antworten (Verpasser vs. Korrekte Zurückweisung) und in der Target-80%-Bedingung die ‚Target'-Antworten (Treffer vs. Falscher Alarm). Deskriptiv erscheint in der 20%-Bedingung (linksseitige Abbildungen) nur bei zwei Probanden(HK und DH) die seltene Target-Darbietung mehr Dilatation als die häufige Blank-Darbietung zu bedingen. In der rechten Spalte hingegen zeigt sich bei fast allen Patienten das gegenteilige Bild: Hier gehen oft die (seltenen) Blank-Darbietungen mit einer stärkeren Dilatation einher (SPE-Zeitfenster von 751-1150 ms ist gestrichelt dargestellt).*

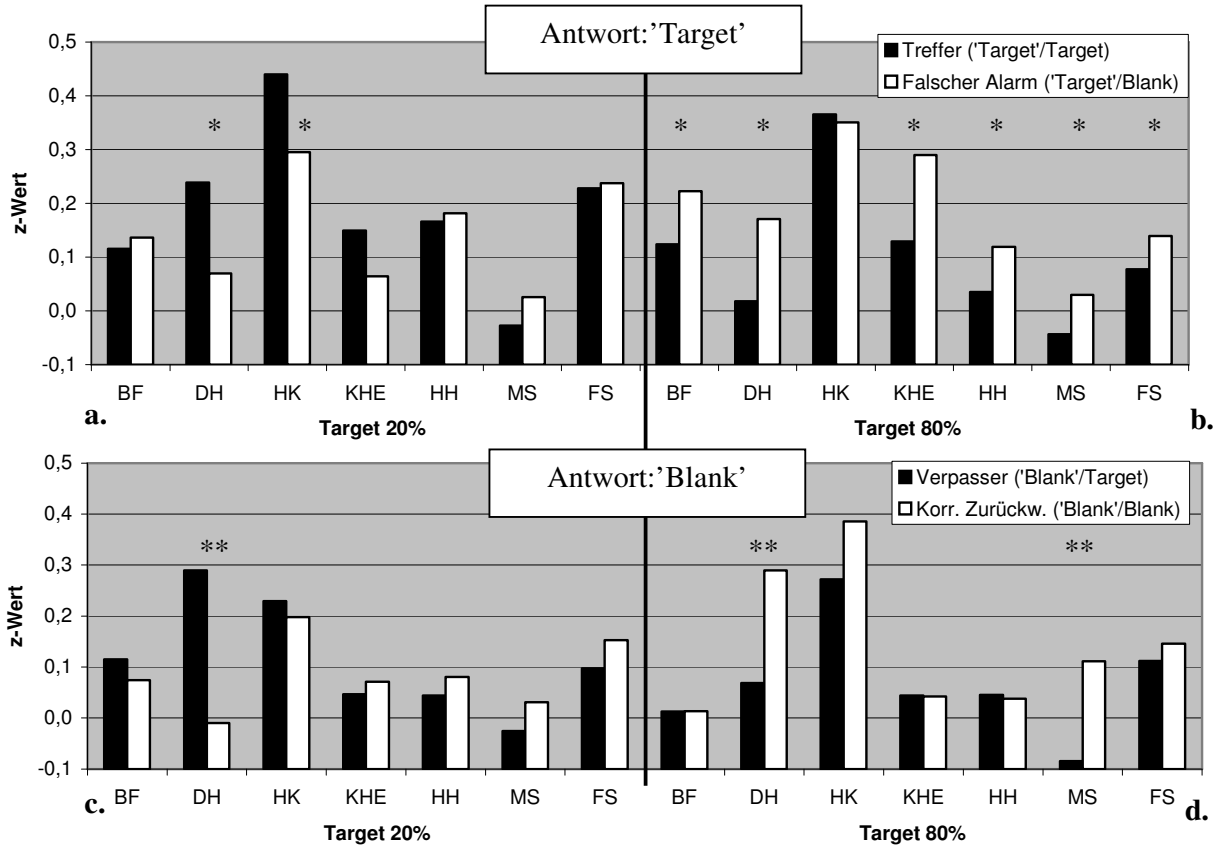


Abb. 21 a-d*: Blindes Feld: Pupillendilatationen in Abhängigkeit von der Antwort (zeilenweise a. und b. bzw. c. und d) und der Target-Wahrscheinlichkeit (spaltenweise a. und c. bzw. b. und d.); Target-Darbietungen sind immer mit schwarzen, Blank-Darbietungen immer mit weißen Balken dargestellt; linke Spalte: Targets entsprechen hier dem seltenen Ereignis und sollte bei vorhandenem SPE in der Balkenhöhe stärker hervortreten als Blanks, die das häufige Ereignis darstellen; rechte Spalte: Targets mit 80 %-iger Darbietung entsprechen hier dem häufigen Ereignis und sollten deswegen bei Vorliegen eines SPE's den Blank-Darbietungen unterlegen sein; (* p ≤.05 ; ** p ≤.01), siehe Text*

Patienten (DH, HK) signifikant höhere Pupillendilatationszuwächse zu verzeichnen haben, wenn die Targets selten dargeboten werden (M-W-U-Test: DH; z=-2,445; p<.014; HK: z=-2,162; p<.031).[35] Diese zwei Patienten waren dieselben, die auch psychophysisch ein signifikantes Ergebnis haben erzielen können. In der Abbildung rechts daneben (Target in 80%; Antwort ‚*Target'*) haben dagegen sechs von sieben Patienten ein signifikantes Ergebnis erzielen können: Nur HK, der zuvor in der Psychophysik schon signifikante Entdeckungsleistung erbringen konnte, zeigt keinen signifikanten SPE.

[35] Die Anzahl der in die Statistik eingehenden Werte entspricht weitgehend der der Häufigkeiten für die jeweilige Antwort-Kategorie (siehe Tabelle 15), wobei Trials, die pupillometrisch zu artefaktbeladen waren, ausgeschlossen werden mussten. Beispiel: HK antwortete in der Target-20%-Bedingung 144 Mal mit ‚Target' und erzielte dabei 100 Treffer und 44 Falsche-Alarme; zwei Treffer-Trials konnten pupillometrisch jedoch nicht verwertet werden, so dass 98 Treffer-Differenzen (SPE minus pre-SPE) 44 Falsch-Alarm-Differenzen gegenübergestellt und mittels M-W-U-Test untersucht wurden.

Die Ergebnisse der ‚*Blank'*-Antworten sind in der unteren Zeile dargestellt; hier fällt nur DH in der Target-20%- und DH sowie MS in der Target-80%-Bedingung mit einem signifikanten SPE ($p<.05$) heraus; die Pupillenreaktionen der anderen Patienten lassen auf Grundlage der hier verwendeten Analyse keinen SPE erkennen.[36]

5.1.8 A1: Diskussion

Die Stimulation im gesunden Gesichtsfeld erbrachte einen signifikanten SPE, wodurch die Annahme gestützt wird, dass nicht die physikalischen Parameter, sondern eher psychosensorische Faktoren, hier: die Auftretens-Wahrscheinlichkeit der Stimuli, das Ausmaß der Dilatation steuern.

Bei der Stimulation im blinden Gesichtsfeld zeigten zwei von sieben Patienten einen signifikanten Effekt in der Entdeckungsleistung. Diese zwei Patienten (DH und HK) zeigten auch pupillometrisch einen SPE (wobei HKs Pupillendaten unklar sind und deswegen noch zu diskutiert werden). Darüber hinaus konnten in der Target-80%-Bedingung für alle anderen Patienten auch ein SPE ermittelt werden, mit Blick auf den Vergleich *Treffer* vs. *Falscher Alarm* waren sechs von sieben Patienten signifikant. Wenn die Patienten mit ‚*Blank'* antworteten, war der Effekt nur noch bei DH und z.T. MS vorhanden.

Mit Blick auf die Studien zum Pupillenlichtreflex (z.B. Loewenfeld 1958) zeigte sich, dass der hier verwendete Stimulus schon im gesunden Feld keine deutliche (frühe) Pupillenreaktion ausgelöst hat. Diese hätte sich nach Studien von BARBUR (2004) zeigen müssen, wenn der Stimulus größer gewesen, länger dargeboten worden wäre oder einen stärkeren Kontrast aufgewiesen hätte. Im blinden Feld ist zwar prinzipiell auch ein Pupillenlichtreflex auslösbar, jedoch wird er – im Gegensatz zur Stimulation im gesunden Feld - als signifikant reduziert beschrieben. Studien von WEISKRANTZ und Kollegen zufolge sollten Patienten mit hohen Entdeckungsleistungen auch einen stärkeren Pupillenlichtreflex aufweisen (Korrespondenz von Psychophysik und Pupillometrie). Wie nun sahen die frühen Antworten bei psychophysisch signifikanten Patienten aus? Bei einem Patienten (DH) fanden wir tatsächlich einen frühen Anstieg in der Target-20%-Bedingung. In der Target-80%-Bedingung jedoch zeigt eher die seltene Blank-Bedingung einen etwas stärkeren Anstieg in der frühen Phase, was nicht für eine Reaktion auf die Lichtverhältnisse spricht. Bei HK, der ebenfalls eine signifikante Entdeckungsleistung zeigte, blieb die frühe Reaktion nach Stimulation im blinden Feld ganz aus: Da auch die Pupillenreaktionen nach Stimulation im

[36] Z-Werte wurden immer auf zwei Nachkomma-Stellen auf- (>5) bzw. abgerundet (≤ 5); p- und F-Werte entsprechend auf drei Nachkomma-Stellen; die Entdeckungsleistung (in Prozentpunkten) hingegen nur ganzzahlig.

gesunden Feld in der Regel erst nach 500 ms post stimulus onset einsetzen, spricht dieser Befund eher gegen Pupillenreaktionen auf Leuchtdichteveränderungen. Für das Ausbleiben des Pupillenlichtreflexes wurden bereits die Stimulusdauer (hier: 306 ms) und der log Kontrast (hier: 0,61) angeführt. Mit Blick auf die Exzentrizität der Stimuli ist keine substanzielle Veränderung zu vorausgegangen Studien eingeführt worden, so dass hier vermutlich kein Grund vorliegen dürfte. Es wäre aber denkbar, dass eine *monokulare* Licht-Stimulation zusätzlich den Effekt soweit reduziert hat, dass er hier nicht mehr sichtbar (vgl. Thompson, 1947) oder von anderen Faktoren wie dem SPE überlagert wurde. Dass die Pupille hier nicht (primär) auf die physikalischen Eigenschaften reagierte, zeigten die Ergebnisse der Blank-Trials in der Target-80%-Bedingung, die zu größeren Dilatationen als die entsprechenden Target-Trials führten, *obwohl* in erstgenannten Trials ja keine Luminanzveränderung stattgefunden hatte.

Mit Blick auf die *späten* Antworten der Pupille konnte festgestellt werden, dass in diesem Experiment tatsächlich die pupillometrischen Daten sensitiver erscheinen als die psychophysischen. Letzteren zufolge haben wir es in der Stichprobe mit zwei „Blindsehern" zu tun, erstgenannten zufolge mit mindestens sechs, möglicherweise aber auch allen sieben Patienten.

Bezüglich der Sensitivität stellt sich jedoch die Frage, warum dieser SPE nicht auch in der Target-20%-Bedingung und bei den ‚*Blank'*-Antworten der Target-20%- sowie Target-80%-Bedingung auftrat? Ferner muss gefragt werden, warum HK, der psychophysisch in der Target-20%-Bedingung die überzeugendste Entdeckungsleistung von allen Patienten erbracht hatte (Trefferrate: 80%; Falsch-Alarmrate: 9,2%), nicht auch pupillometrisch signifikant wurde. Obwohl die Fragen größtenteils nicht evidenzbasiert beantwortet werden können, möchte ich hypothetische Erklärungsansätze vorschlagen. Beginnen wir mit der zuletzt genannten Frage: HKs psychophysische Entdeckungsleistung möge einen aufmerksamen Leser skeptisch stimmen lassen, ob dieser Patient mit Blick auf die visuelle Wahrnehmung in seinem blinden Feld wirklich mit anderen klinisch blinden Patienten vergleichbar ist. Den Ausführungen von HK zufolge kann er durchaus in die Gruppe mit „absolutem Ausfall" eingeordnet werden, denn er gibt – wie alle anderen Patienten auch - an, dass er „nichts" im blinden Feld sehe. Gleichwohl beschreibt dieser Patient von einigen Trials, dass er eine leichte Empfindung gehabt habe, etwas Visuelles „gespürt" (nicht gesehen) zu haben. Diese Empfindung ließe sich mit Worten nicht beschreiben (HK). Aus diesem Grunde *könnte* HK - auch mit Blick auf die hohe Entdeckungsleistung - als Patient gewertet werden, dessen „Sehfähigkeit" weniger gestört ist als die der übrigen Patienten. Wenn HK also eine

möglicherweise geringfügig höhere visuelle Bewusstheit im blinden Feld aufweise und somit ein geringfügig überschwelliges Residualsehen erfahre (was noch zu diskutieren ist), dann sollte aufgrund von vorausgegangenen Studien (z.B. Qiyuan et al., 1985) die Pupillenreaktionen in Gestalt des SPE dann *gerade* einen signifikanten SPE ergeben. Ein Blick auf die Dilatationshöhe in der Target-80%-Bedingung lässt erkennen, dass die seltene Blank-Präsentation (hier: *Falsche Alarme*) sehr wohl einen hohen Dilatationszuwachs zur Folge hatte; sie ist sogar die stärkste Dilatation von allen Patienten. Der springende Punkt ist aber, dass *auch* die Target-Darbietung zu einer starken Dilatation führte, so dass kein signifikanter Unterschied entstand. Meines Erachtens könnte die letztgenannte Dilatation aber auch ein Produkt des angesprochenen, leicht überschwelligen Residualsehens sein, das HKs vegetatives Nervensystem in Form von Gedanken wie „Ja, ich glaube etwas gespürt zu haben!" in Erregung versetzt haben mag. Sollte HK tatsächlich in dem ein oder anderen Trial eine „deutlichere" Empfindung verspürt haben als sonst, könnten diese Trials eine Dilatation mit sich bringen, die dann nicht stimulus- sondern eher erfolgs- oder emotionsabhängig wäre. Die „Freude" über Empfindungen im blinden Feld allein hätte dann in den Target-Trials zu einem Erregungsanstieg (Arousal) im Vegetativum und somit in der ARAS führen können.[37]

Kommen wir zu der Frage, warum die Pupillendilatationen bei den ‚*Blank'*-Antworten insgesamt weniger SPE erzeugten als die bei ‚*Target'*-Antworten. Auch hier möchte ich einige Gedanken zum Ausdruck bringen: ‚*Blank'*-Antworten haben gemein, dass sie „kongruent" zur visuellen Wahrnehmung sind, d.h. die Patienten haben keinen Stimulus gesehen und antworten auch gemäß ihrer Wahrnehmung. Die Antwort ‚*Blank'* kann also als eine Art „Standardantwort" gesehen werden, die der „subjektiven Wahrheit" entspricht und bei der die Vp ‚nichts Falsches' antworten kann. Hinzu kommen möglicherweise Schwankungen in der Konzentration und Motivation während des Experimentes; eine Folge daraus könnte sein, dass in Phasen niedriger Aufmerksamkeit /Konzentration (A/K) verhältnismäßig oft die ‚*Blank'*-Antwort gewählt wurde. Andersherum kann vermutet werden, dass in Trials, in denen die Patienten entgegen ihrer Wahrnehmung die ‚*Target'*-Taste gewählt und damit die *zu ihrem Erleben inkongruente Antwort* gewagt haben, ein (unspezifischer) Arousal-Anstieg stattfand. Von dessen Plateau aus könnte sich eine schwellennahe Stimulusverarbeitung in Form eines SPE eher bemerkbar machen als in den vergleichsweise weniger „angeregten" Phasen. Zusammengefasst ruht diese Erklärung auf folgenden Überlegungen: Erstens, die A/K schwankt innerhalb eines Experiments, zweitens, in Phasen niedriger A/K wird häufiger die Antwort ‚*Blank'* gewählt (Kongruenz-Argument),

[37] Dieser Erklärungsansatz muss jedoch als rein spekulativ eingestuft werden und entbehrt jeder empirischen Grundlage.

drittens, in Phasen niedriger A/K liegt in der ARAS ein niedriges Aktivitätsniveau vor, das viertens relativ schwache wahrscheinlichkeitsabhängige Informationsprozesse unterhalb einer Schwelle „versanden“ lässt. Bisher ist allerdings unklar, welchen Effekt die *Aufmerksamkeit* auf den SPE wirklich hat.

Es bleibt nach den bisherigen Ausführungen noch zu diskutieren, warum die Target-20%-Bedingung unter der Antwort ‚*Target’* – die ja den vorherigen Ausführungen folgend auch inkongruent ist - nicht häufiger signifikant wurde.[38] Auch hierzu möchte eine Erklärung vorschlagen: Die Frage ist anders formuliert die, warum eine seltene Target-Darbietung (in Target-20%) *weniger* SPE auszulösen vermag als eine seltene Blank-Darbietung (in Target-80%)? Der nachfolgende Erklärungsvorschlag beruht auf einfachen Lerngesetzen wie sie von IWAN PAWLOW beschrieben wurden: die Entdeckung des bedingten Reflexes. Konkret: Wenn ein akustischer Reiz (Ton) in zeitlicher und räumlicher Nähe mit einem (relevanten) visuellen Stimulus präsentiert wird, kann der zuvor neutrale Stimulus bei alleiniger Darbietung die „Macht“ des relevanten Stimulus übernehmen. Meines Erachtens könnte in diesem Experiment eine unbewusst verlaufende, reflexive Konditionierung stattgefunden haben, und zwar dergestalt, dass der Hinweisreiz, der ja immer 500 ms vor Stimulus onset dargeboten wurde, mit der grauen Scheibe (als relevantem Reiz) assoziiert wurde. Diese Assoziation konnte besser gelernt werden in Experimentalblöcken, in denen diese Abfolge relativ häufig erscheint: Dies war verstärkt in den Target-80%-Blöcken und nur vermindert in den Target-20%-Blöcken der Fall. In letzteren konnte eine Assoziation von Ton und Stimulus deswegen schlechter gelernt werden, weil ja in der Regel (d.h. 80%) nur der akustische Hinweisreiz präsentiert wird (das Target erschien nur in 20%). In Target-80%-Blöcken jedoch ist die Kombination „Ton-Target“ eher die Regel als die Ausnahme. Wenn nun eine solche Assoziation hergestellt und dann in den seltenen Blank-Trials verletzt werden würde, erführe der SPE zusätzlichen Auftrieb, währenddessen in der Target-20%-Bedingung diese Assoziation vermutlich schwächer und somit der Effekt einer Verletzung geringer sein dürfte.

Was den Vergleich von Pupillendaten zwischen gesundem und blindem Feld angeht, muss beachtet werden, dass die Trialanzahl unterschiedlich war: 200 Trials im gesunden und 300 Trials im blinden Feld pro Target-Bedingung. Zwar steigt mit zunehmendem Stichprobenumfang die Wahrscheinlichkeit, ein signifikantes Ergebnis zu erhalten (vgl. Bortz & Lienert, 1998), jedoch sollten sich meines Erachtens die 100 zusätzlichen Trials im blinden Feld nicht substanziell gegen einen Vergleich der Pupillendaten aussprechen.

[38] Die Beobachtung einer etwas stärkeren Dilatation nach *Auslassung* eines Reizes wurde auch schon von Qiyuan und Kollegen (1985) gemacht (siehe 3.4.3), aber nicht erklärt.

Zusammenfassend zeigte sich im gesunden Feld bei allen ein hochsignifikanter und im blinden Feld bei fast allen untersuchten Patienten ein signifikanter SPE, *obwohl* – was das blinde Feld betrifft - psychophysisch nur zwei eine signifikante Entdeckungsleistung aufwiesen.[39]

[39] Die vergleichsweise geringe Anzahl von psychophysisch signifikanten Patienten wird in der Allgemeinen Diskussion nochmals aufgegriffen.

5.2 A2: Einzelfall-Studie (Teil 1: Stimulus-Wahrscheinlichkeiten)

Die folgende Einzelfall-Studie besteht aus drei Teilen und versucht, offen gebliebene Fragen, die z.T. aus dem vorherigen Experiment stammen aufzuklären. Teil 1 untersucht den psychophysischen und pupillometrischen Effekt von Trials mit *unmittelbarem Feedback* sowie *verschiedenen Target-Wahrscheinlichkeiten* (1), Teil 2 den von unterschiedlichen *retinalen Stimulationen* (2) und Teil 3 den Einfluss der *Aufmerksamkeit* (3).

5.2.1 A2: Einleitung (1)

Bei sechs Patienten mit postgenikulären Störungen konnte in Exp.A1 ein signifikanter SPE ermittelt werden[40], obwohl die Stimuli im blinden Feld dargeboten wurden und nur zwei von ihnen psychophysisch eine (implizite) Informationsverarbeitung erkennen ließen. Dieses Ergebnis zeigte, dass die Pupillometrie (in Form des SPE) sensitiver ist als die Psychophysik (in Form des 2-AFC-Verfahrens), warf aber auch eine Reihe von Fragen auf.

Beginnen wir mit Überlegungen zum Verhältnis der Stimuli: Der SPE wurde bislang untersucht, indem Pupillendilatationen von seltenen und häufigen Stimulusdarbietungen verglichen wurden, definiert als 20%- bzw. 80%-ige Auftretenswahrscheinlichkeit. Dieses Verhältnis hatte sich in vorausgegangenen Studien (z.B. Qiyuan et al., 1985) zum SPE-Nachweis als notwendig erwiesen, wohingegen eine Gegenüberstellung von 20- zu 50%-iger sowie 50- zu 80%-iger Auftretenswahrscheinlichkeit (nur) tendenzielle, aber nicht signifikante Effekte erbracht hat. Unklar ist, warum diese Verhältnisse keinen Effekt erbrachten: Denkbar wäre, dass die Differenz - jeweils 30 Prozentpunkte, die die zu vergleichenden Bedingungen unterschied - zu gering war, um pupillometrisch signifikant zu werden. Zur Klärung wäre eine Untersuchung von Nöten, in der systematisch verschiedene Verhältnisse von Target- und Blank-Darbietungen variiert werden: Mithilfe des bereits untersuchten Patienten HK, der sich für diese Studie erneut zur Verfügung gestellt hatte, wurden die Pupillendilatationen bei 35, 50, und 65%-iger Target-Darbietung untersucht und in die bereits vorliegenden Ergebnisse der 20 und 80%-igen Darbietung eingebettet. Dabei stand die Frage im Zentrum, ob sich das geringere (Stimuli in 35% und 65%) bzw. fehlende Gefälle (Stimuli in 50%) der Auftretenswahrscheinlichkeiten quantitativ in die bereits vorliegenden SPE-Ergebnisse einordnen lassen. Neben dieser eher deskriptiven Fragestellung wird ferner zu untersuchen sein, ob eine 35%-ige Darbietung trotz eines relativ flachen

[40] In der Bedingung, die sich als optimal erwies

Gefälles von 30 Prozentpunkten eine signifikant größere Pupillenerweiterung auslöst als die 65%-ige.

Ferner soll in Erfahrung gebracht werden, ob die Darbietung eines unmittelbaren akustischen Feedbacks (bezüglich der Richtigkeit der Antwort) einen Effekt auf die Pupillendilatation und auf die psychophysische Entdeckungsleistung hat. Motiviert wurde diese Fragestellung aus folgender Beobachtung: Patienten, die nach jeder Entscheidung (hier: ‚*Target'* oder ‚*Blank'*) ein Feedback erhalten (richtig oder falsch), schildern ein größeres Interesse, an den Versuchen teilzunehmen.[41] Ein solches Feedback ist – was das Training als solches angeht - am effektivsten nach der jeweiligen Antwort, da der Patient schwache Empfindungen, die evt. auftreten können (und im Training angestrebt werden) einzuschätzen lernt. Ein positiver Nebeneffekt könnte insofern auftreten, als dass die Aufmerksamkeit und Konzentration für jeden Trial erhöht werde, da – aus Sicht des Patienten - das Experiment eher als Trainingseinheit verstanden werden kann und somit interessanter bzw. informativer ist. Ein unmittelbares Feedback kann aber auch von Nachteil sein: zum Beispiel wenn ein Patient abgelenkt wird oder bei vielen falschen Antworten resigniert. Darüber hinaus besteht die Gefahr, dass die Pupillenaufzeichnung, die visuell evozierte Informationsverarbeitungsprozesse erfassen soll, durch kognitive Prozesse wie Wahrscheinlichkeits-Berechnungen unterlaufen wird, die ebenfalls die Pupillenweite verändern können.[42] Dass das Wissen über die Target-Wahrscheinlichkeit per se keinen substanziellen Einfluss ausübt, wurde auch schon von FRIEDMAN et al. (1973) gezeigt (siehe 3.4.3). Wenn nicht anders vermerkt, wurde immer das temporale Gesichtsfeld stimuliert, d.h. der Patient trug eine Augenklappe auf dem ipsiläsionalen (rechten) Auge.

5.2.2 A2: Hypothesen (1)

Wenn Stimuli mit einer Auftretenswahrscheinlichkeit von 35% erscheinen, erzeugen sie einen stärkeren SPE gegenüber Stimuli, die mit 65%-iger Wahrscheinlichkeit dargeboten werden. Eine gleichwahrscheinliche Darbietung von Target- und Blank-Stimuli (50%) erzeugt keine nennenswerten Unterschiede in der Pupillenweite. Ferner unterscheiden sich die

[41] Diese Präferenz ist nicht verwunderlich, wenn man bedenkt, dass der Patient über den Versuch hinweg selber keinerlei Anhalt hat, ob seine Antworten falsch oder richtig sind. Da die Patienten aber in erster Linie zum Training des blinden Feldes ins hiesige Institut kommen, ist es oft von Vorteil, in Experimenten eine Rückmeldung zu geben.

[42] In Experimenten mit unmittelbarem Feedback ist die ungefähre *Target*-Wahrscheinlichkeit schnell über das Feedback zu ermitteln, da z.B. viele falsche ‚Target'-Antworten vermuten lassen, dass es sich insgesamt um eine seltene Darbietung von Targets handelt. Aufgrund solcher Erwägungen könnten letzten Endes die Patienten-Antworten mit kognitiven Elementen konfundiert sein.

psychophysischen (2-AFC) und pupillometrischen (SPE) Entdeckungsleistungen bei Blöcken mit und ohne unmittelbares Feedback (ungerichtete Hypothese).

5.2.3 A2: Untersuchungszeitraum (1)

Der Untersuchungszeitraum erstreckt sich für die gesamte Einzelfallstudie von April bis November 2004 über ca. zehn Zeitstunden in acht Sitzungen; die Teilnahme erfolgte freiwillig; der Patient erhielt eine Kostenentschädigung.

5.2.4 A2: Trialaufbau und Versuchsdesign (1)

Der Trialaufbau entspricht exakt dem des vorherigen Experiments: Die einzige Ausnahme bildet das akustische Feedback an den Patienten, das immer 200 ms nach Betätigen der Antwort-Tasten erfolgte. Bei einer richtigen Antwort (‚*Target'*/Target und ‚*Blank'*/Blank) ertönte ein tiefer Ton (250 Hz; ~40 dB), bei einer falschen (‚*Target'*/Blank und ‚*Blank'*/Target) ein hoher (1000 Hz; ~ 40dB).[43]

Der Patient erhielt ausreichend Gelegenheit, sich an diese Rückmeldung zu gewöhnen. Er wurde zudem gebeten, verzögert, d.h. erst ein bis zwei Sekunden nach Stimulus onset zu antworten: Der Grund lag darin, dass Erfolgs- oder Misserfolgs-Rückmeldungen die Pupillendaten im entscheidenden SPE-Zeitfenster konfundiert hätten. Ansonsten lautete die Instruktion wie im vorherigen Experiment. In Blöcken *ohne* Feedback erhielt HK allerdings keine Information zur Auftretenswahrscheinlichkeit der Reize. In Blöcken *mit* Feedback wurde das Verhältnis explizit mitgeteilt. Insgesamt durchlief der Patient pro Verhältnis (35, 50 oder 65 % Target) – einmal *mit* und einmal *ohne* unmittelbares Feedback – je drei Durchgänge, in denen Targets und Blanks im blinden Feld präsentiert wurden. In Tabelle 12 ist die absolute Anzahl der Trials aufgelistet.

Tab. 12: *Versuchdesign: Anzahl der Trials, die pro Wahrscheinlichkeits-Bedingung (spaltenweise) und in Abhängigkeit vom Feedback bzw. der Information zum Target-Blank-Verhältnis durchgeführt wurden. Die Daten aus den Target-20% und Target-80%-Bedingungen wurden aus dem vorherigen Experiment übernommen.*

Wahrscheinlichkeit	20%	35%	50%	65%	80%
mit Feedback	600 Trials	300 Trials	300 Trials	300 Trials	600 Trials
ohne Feedback	600 Trials*	300 Trials	300 Trials	300 Trials	600 Trials*

* 300 Trials *mit* und 300 Trials *ohne* Information zum Verhältnis

[43] In einem Vorexperiment wurde überprüft, ob die alleinige Darbietung der beiden akustischen Töne von 250 bzw. 1000 Hz (die zu diesem Zeitpunkt noch neutral waren) einen pupillometrisch Effekt hat. Das Ergebnis war negativ.

5.2.5 A2: Ergebnisse (1)

Wie zuvor werden zunächst die psychophysischen Ergebnisse besprochen, die Grundlage der pupillometrischen Auswertung sind.

5.2.6 A2: Psychophysik (1)

HKs psychophysische Ergebnisse knüpften an die bereits hohen *Treffer*- bzw. niedrigen *Falsch-Alarm*-Raten aus dem vorherigen Experiment an: Wie Tabelle 13 zu entnehmen ist, liegt seine *Treffer*-Rate in den hier untersuchten Bedingungen (Target 35%, 50% und 65%) zwischen 66,7%- und 92,3%-Punkten, analog dazu machte er bei seinen ‚*Target'*-Antworten in nur 1,9% bis max. 10,7% einen Fehler (Falsch-Alarm-Rate). Die entsprechenden p-Werte des 4-Felder-Chi-Quadrat-Tests liegen alle unter p<.000. Beim Vergleich der *Treffer*- und *Falsch-Alarm*-Mittelwerte erzielt HK *mit* Feedback eine um 14,1%-Punkte höhere *Treffer*-Rate als in den Blöcken *ohne* Feedback (86,7%- vs. 72.6%-Punkte), der entsprechende Vergleich bei den gemittelten Falsch-Alarm-Werten beträgt nur 1,4 Prozentpunkte (8,2% vs 6,8%). Nur die korrekten Antworten[44] betrachtend erwies HK in der Feedback-Bedingung eine signifikant (n=5; z=2,023; p<.045) höhere Leistung als in den Versuchsdurchgängen ohne Feedback.

Tab. 13: *Die psychophysischen Ergebnisse mit und ohne Feedback lassen über alle Target-Verhältnisse hinweg eine hohe Treffer- und niedrige Falsch-Alarm-Rate (in Klammern stehend) erkennen; die Verpasser- und Korrekte-Zurückweisungs-Raten bilden das jeweilige Pendant zu den Treffer- bzw. Falsch-Alarm-Raten und ergänzen sich jeweils auf 100%.*

Mit Feedback	Treffer	F. Alarm	Verpasser	Korr. Zurückw.	Summe
Target 20%	99 (82,5%)	17 (3,5%)	21 (17,5%)	463 (96,5%)	T:120; B: 480
Target 35%	87 (82,9%)	14 (7,2 %)	23 (17,1%)	181 (92,8%)	T:105; B: 195
Target 50%	125 (83,3%)	16 (10,7 %)	25 (16,7%)	134 (89,3%)	T:150; B: 150
Target 65%	180 (92,3%)	10 (9,5 %)	15 (7,7%)	95 (90,5%)	T:195; B: 105
Target 80%	443 (92,3%)	12 (10,0%)	37 (7,7%)	108 (90,0%)	T:480; B:120
Mittelwert	**86,7%**	**8,2%**	**13,3%**	**91,8%**	
Ohne Feedback	Treffer	F. Alarm	Verpasser	Korr. Zurückw.	Summe
Target 20% *	100 (83,3%)	44 (9,2%)	20 (17,7%)	436 (90,8%)	T:120; B: 480
Target 35%	73 (69,5%)	6 (3,1 %)	32 (30,5%)	189 (96,9%)	T:105; B: 195
Target 50%	100 (66,7%)	7 (5,7 %)	50 (33,3%)	143 (94,3%)	T:150; B: 150
Target 65%	142 (72,8%)	2 (1,9 %)	53 (27,2%)	103 (98,1%)	T:195; B: 105
Target 80% *	339 (70,6%)	17 (14,2%)	141 (29,4%)	103 (85,8%)	T:480; B:120
Mittelwert	**72,6%**	**6,8%**	**28,4%**	**93,2%**	

* Ergebnisse wurden aus dem „Empfindungs-Experiment" (B1) übernommen und beruhen auf 600 Trials.

[44] Korrekte Antworten sind die Treffer- und Korrekte-Zurückweisungs-Rate pro Target-Wahrscheinlichkeit.

Abbildung 22 verdeutlicht das Verhältnis von *Treffer*- zu *Falsch-Alarm*-Raten anhand eines ROC-Diagramms: Abb. 22**a** (links) zeigt die ROC-Kurve *mit* Feedback, Abb. 22 b (rechts) ohne Feedback.

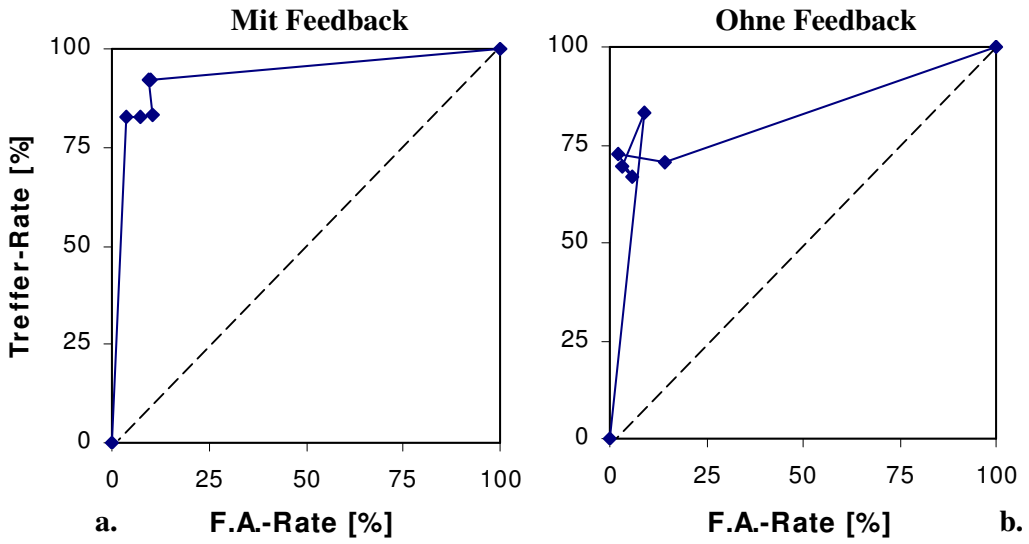


Abb. 22: *Psychophysisches Resultat: Die einzelnen Punkte entsprechen den Target-Wahrscheinlichkeiten, wobei die Koordinaten 0/0 und 100/100 für den Kurvenverlauf hinzugefügt wurden. Sowohl in der linken Graphik (mit Feedback,* ***a.****) als auch in der rechten (ohne Feedback,* ***b****) zeigt sich ein deutliches Übergewicht zugunsten der Treffer-Rate (bezogen auf die Falsch-Alarm-Rate); die gestrichelt, diagonal verlaufenden Linien entsprechen dem Rate-Niveau. In* ***a****. liegen zwei Punkte übereinander, weswegen dort nur vier zu sehen sind; alle Koordinaten sind in Tab.13 ersichtlich; die ermittelte Entdeckungsleistung ist in allen Bedingungen hochsignifikant; siehe Text.*

5.2.7 A2: Pupillometrie und Korrespondenz zur Psychophysik (1)

Die Pupillendaten wurden antwort-spezifisch gruppiert und ausgewertet, so dass *Treffer* vs. *Falsch-Alarm* (Antwort: ‚*Target*') sowie *Verpasser* vs. *Korrekte Zurückweisung* (Antwort: ‚*Blank*') verglichen wurden (Abb. 23). Es stellte sich jedoch bei denjenigen Pupillendaten, die in die Gruppe der *Falschen Alarme* einzugruppieren sind, das Problem, dass nur wenige Trials vorlagen (vgl. Tab. 13), was insbesondere in den Experimentalblöcken *ohne* Feedback die Auswertung erschwerte bis unmöglich machte. In der Auswertung *mit* Feedback ist – um überhaupt ein Einblick über das Pupillenverhalten bei ‚*Target*'-Antworten zu bekommen - die minimale Trialanzahl auf zehn reduziert worden.[45] Zusätzlich eingezeichnet ist die Regressionsgerade. Deren Steigung gibt einen Eindruck über die Intensität des SPE, der bei

[45] Bislang mussten 20 Trials vorliegen, damit eine statistische Berechnung erfolgte. Für die Bedingungen *ohne* Feedback in den 35, 50 und 65% Target-Darbietung wurde allerdings auf eine Auswertung verzichtet, da die Trialanzahl hier sogar unter zehn fiel.

‚*Target'*-Antworten in den Feedback-Blöcken am deutlichsten ausfällt ($-8{,}4 \times 10^{-3}$). Beispiel Abb. **23a**: In der Target-20%-Bedingung (Abszisse links) liegt in *Treffer*-Trials eine ca. 0,3 z-Wert-Einheiten stärkere Pupillendilatation vor als in entsprechenden *Falsch-Alarm*-Trials. Obwohl in beiden Fällen ‚*Target'* geantwortet, also psychophysisch kein Unterschied zurückgemeldet wurde, zeigt die Pupillenreaktion eine stärkere Antwort bei Darbietungen der hier seltenen Targets an. In 23a verweilend erkennen wir, dass sich ab der Target-50%-Bedingung das Verhältnis umkehrt: Negative z-Werte bedeuten, dass die Dilatation bei häufiger Target-Darbietung geringer ist, was die Vermutung stützt, dass die Auftretenswahrscheinlichkeit des Targets für die Pupillenreaktion verantwortlich ist. Die Steigung der Regressionsgeraden ist in **23a** mit $-8{,}4 \times 10^{-3}$ am höchsten, was für einen vergleichsweise starken SPE spricht.[46] In Abbildung **23b** flacht die Steigung ab: Jedoch bleibt auch bei ‚*Blank'*-Antworten (mit Feedback) die Abhängigkeit von der Target-Wahrscheinlichkeit erkennbar. Wenn kein Feedback gegeben wird **(23c),** flacht die Steigung der Regressionsgeraden – auch bei ‚*Target'*-Antworten- noch weiter ab ($-2{,}6 \times 10^{-3}$), wobei hier zu bedenken ist, dass HK kaum *Falsche Alarme* in den Bedingungen 35, 50 und 65% gezeigt hat. Der Aussagewert der Steigung ist deswegen gering, weswegen die Gerade nur gestrichelt dargestellt wurde. Für ‚Blank' Antworten **(23d)** finden wir ebenfalls eine vergleichsweise flache Regressionsgerade ($-2{,}3 \times 10^{-3}$).

[46] Auf eine inferenzstatistische Analyse wurde aufgrund einer geringen Trialanzahl verzichtet.

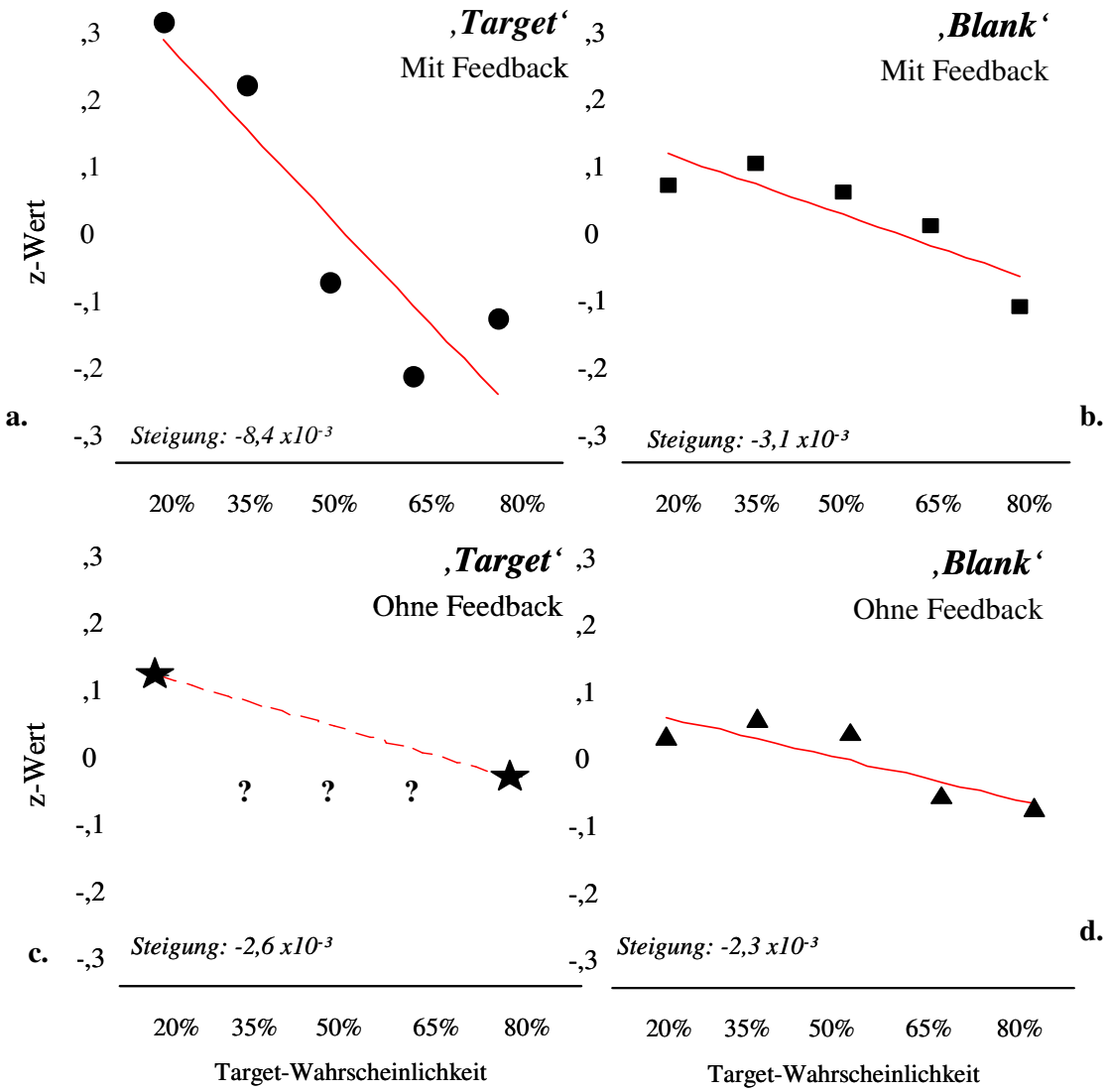


Abb. 23 a-d: *Pupillenreaktionen in Abhängigkeit von der Target-Wahrscheinlichkeit, gruppiert nach der Antwort (‚Target' vs. ‚Blank') und unmittelbarem Feedback (mit vs. ohne). Dargestellt sind die Differenzen (schwarze Symbole) der Pupillenreaktionen:* **a.)** *und* **c):** *Treffer (‚Target'/Target) minus Falscher Alarm (‚Target'/Blank);* ***b.)*** *und* **d):** *Verpasser (‚Blank'/Target) minus Korrekte Zurückweisung (‚Blank'/Blank).*

5.2.8 A2: Diskussion (1)

Die psychophysischen Resultate – sowohl mit Feedback als auch ohne - zeigen beeindruckende Entdeckungsleistungen: Die *Treffer*-Rate *mit* Feedback liegt allerdings signifikant höher als *ohne* Feedback. Dass die visuelle Stimulation nicht eindeutig überschwellig ist, zeigt die *Verpasser*-Rate, die sich invers zur *Treffer*-Rate verhält, d.h. wenn ein Target tatsächlich dargeboten wurde, hat HK es zwar in 86,7 % entdeckt (mit Feedback), in 13,3% dieser Target-Trials aber auch „übersehen" bzw. nicht erkannt. Im Beispiel verweilend können nun die Pupillendilatationen dieser 13,3% *Verpasser*-Trials jenen Trials

gegenüber gestellt werden, in denen tatsächlich kein Target präsentiert worden war (*Korrekte Zurückweisungen*). Dieser Vergleich innerhalb der ‚*Blank'*-Antworten erbrachte trotz psychophysisch gleicher Antwort (‚*Blank'*) einen SPE dergestalt, dass 20%- und 35%-ige, also seltene Target-Darbietungen im Mittel stärkere und i.d.R. 65%- sowie 80%-ige, also häufigere Target-Darbietungen schwächere Dilatationen nach sich zogen als die jeweils dazugehörigen häufigen bzw. seltenen Blank-Darbietungen. Wir sehen diesen Trend der Pupillenantwort besonders deutlich in den Blöcken *mit* Feedback und der Antwort ‚*Target'*: Warum? Möglicherweise hat die Feedback-Bedingung in Kombination mit der inkongruenten[47] Antwort bei dem Patienten ein höheres Maß an Aufmerksamkeit und Konzentration mit sich gebracht als ohne Feedback, was mit der nochmaligen Steigerung der ohnehin schon hohen Entdeckungsleistung einhergehen könnte. Andererseits kann nicht ausgeschlossen werden, dass hier ein Reihenfolge- bzw. Übungseffekt vorliegt, da die Versuchsdurchgänge mit Feedback nach denen ohne Feedback durchgeführt wurden. Dass hier auch die 20%ige Target-Darbietung (Feedback-Bedingung) einen besonders starken Effekt mit sich brachte, steht nicht in Konflikt mit der Beobachtung aus dem ersten Experiment, in dem sich insgesamt die 80%ige Darbietung der Targets als sehr effektiv erwies, weil HK auch in der 20%-Targetbedingung des ersten Experimentes einen signifikanten SPE zeigte. Die pupillometrischen Daten zusammenfassend können wir festhalten, dass eine graduelle Abstufung der Pupillenreaktionen beobachtbar ist, die (zumindest teilweise) von der Auftretens-Wahrscheinlichkeit eines Reizes abhängt. Unklar ist, warum die gleichwahrscheinliche Stimulus-Darbietung (Target 50%) nicht zu Differenzen auf der Null-Linie geführt haben. Sie liegen in einem Fall über und in zweien unterhalb der Null-Linie, was an Mess-Ungenauigkeiten oder nicht näher bestimmbaren konfundierenden Variablen denken lässt. Eine zu geringe Trialanzahl innerhalb der Target- 50%-Blöcke dürfte nicht ausschlaggebend gewesen sein, da selbst Datensätze von mindestens je 50 Trials (~Daten) zu Abweichungen von der Null-Linie führten.

Die Frage, ob HK von dem unmittelbaren Feedback profitiert habe oder vielleicht eher abgelenkt bzw. irritiert wurde, kann zugunsten der Durchgänge *mit* Feedback beantwortet werden. Dies könnte – neben des angesprochenen Reihenfolge-Effekts – aber daran gelegen haben, dass HK fortwährend eine Bestätigung seiner Blindsehleistung erfahren hat, was vermutlich mit einem Motivations- und möglicherweise auch Konzentrationsschub einherging. Gegen den Reihenfolge-Effekt spricht allerdings, dass HK schon an einigen anderen Studien teilgenommen hat, in denen visuelle Reize entdeckt werden mussten, so dass

[47] Möglicherweise ist der Begriff der Inkongruenz hier fehl am Platze; gemeint ist die Antwort, die auf eine visuelle Wahrnehmung im blinden Feld schließen lässt, die auch für HK in der Regel mit Zweifel versehen ist.

ein Übungseffekt vermutlich nicht oder nur in geringem Maße einen Einfluss gehabt haben dürfte.

Auf die Hypothesen zurückblickend kann deswegen angenommen werden, dass sich psychophysisch die Entdeckungsleistung verbessert, wenn ein unmittelbares akustisches Feedback erfolgt und sich - mit Blick auf die SPE-Höhe - die 35%, 50% und 65%ige Target-Darbietung zwischen die 20% und 80%ige Target-Darbietung einreiht.

5.3 A2: Einzelfall-Studie (Teil 2: Naso-temporale Asymmetrie)

Welchen psychophysischen und pupillometrischen Unterschied macht es, wenn Reize nicht auf die nasale, sondern temporale Retinahälfte fallen? Diese Frage umreißt grob den Gegenstand des nächsten Experimentes, das im Folgenden hergeleitet wird.

5.3.1 A2: Einleitung (2)

Die Frage, ob sich die Retinahälften in ihrer Sensitivität unterscheiden, ist bislang nicht eindeutig geklärt: Es sprechen sowohl anatomische als auch funktionelle Studien einmal *für*, einmal *gegen* einen Unterschied. Bereits WERTHEIM konnte 1894 zeigen, dass die Sehschärfe von korrespondierenden Netzhautabschnitten im temporalen Gesichtsfeld (d.h. in der nasalen Retinahälfte) höher ist als im nasalen Gesichtsfeld (temporale Retinahälfte). TEUBER und Kollegen (1960) fanden mithilfe der Perimetrie heraus, dass eine Läsion in der Sehstrahlung bzw. primären Sehrinde im *temporalen* Gesichtsfeld (GF) einen etwas kleineren Ausfall verursacht (graue Fläche in Abb. 24) als im *nasalen* GF (schwarze Fläche. VAN BUREN (1963) untersuchte direkt die Netzhautschichten und fand eine höhere Ganglienzelldichte in der nasalen Retinahälfte. Mit Blick auf subkortikale Strukturen stellte SHERMAN (1974) bei Katzen und ITAYA und VON HOESEN (1983) bei Altweltaffen fest, dass deren extragenikulär-visuellen Systeme mehr Nervenfasern enthielten, die von der *nasalen* Retinahälfte ihren Ursprung nahmen. Ob dies auch für das visuelle System beim Menschen zutrifft, ist nach meinem Kenntnisstand nicht belegt. Jedoch deuten menschliche Verhaltensdaten auf eine ähnliche anatomische Asymmetrie hin: Neugeborene zum Beispiel neigen dazu, auf Reize im temporalen GF eher zu reagieren als auf Reize im nasalen GF

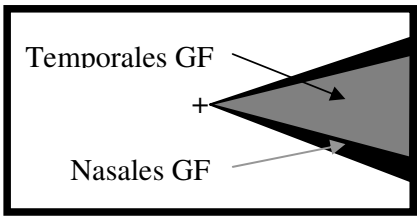


Abb.24*: Schematisch dargestellter Gesichtsfeldausfall im nasalen Feld (schwarze Fläche) ist etwas größer als im temporalen Feld (graue Fläche); siehe Text*

(Lewis et al., 1985).[48] RAFAL und Kollegen (1990) zeigten bei drei hemianopen Patienten, dass die Sakkaden-Latenz auf einen Reiz im ipsiläsionalen GF größer ist, wenn ein Distraktor-Stimulus im kontraläsionalen *temporalen* GF erschien, währenddessen ein Distraktor-Stimulus im kontraläsionalen *nasalen* GF keinen Effekt auf die Sakkaden-Latenz erbrachte.[49] Schließlich veröffentlichten DODDS und Kollegen (2002) die Ergebnisse einer Einzelfall-Studie, in der eine Patientin in einer 2-AFC-Lokalisationsaufgabe ausschließlich bei Stimulation der nasalen Retinahälfte signifikante Ergebnisse erzielen konnte, nicht aber bei einer Stimulation der temporalen.

Diesen positiven Studienergebnissen zur retinalen Asymmetrie stehen jedoch die Ergebnisse zweier Studien entgegen: In der ersten untersuchten WILLIAMS und Kollegen (1995) die naso-temporale Asymmetrie bei vier Makaken-Affen, indem sie das Verhältnis der temporalen zu den nasalen Nervenfasern vor den Coliculli superiores (CS) ermittelten: Sie konnten keine Asymmetrie feststellen. Dies verwundert insofern, als dass die CS für Sakkaden mitverantwortlich gemacht werden, für deren Schnelligkeit bzw. Distraktoranfälligkeit die Arbeitsgruppe um RAFAL (1990) einen Unterschied hatte feststellen können. Eine weitere Studie, die sowohl mit Hemianopikern (n=8) als auch normalsichtigen Vpn durchgeführt wurde, untersuchte erneut den bereits angesprochenen Distraktor-Effekt: Überraschenderweise lag eine funktionale naso-temporale Asymmetrie *nur* bei Normalsichtigen, jedoch bei keinem der sehgeschädigten Probanden vor (Walker et al., 2000). Zu bedenken gilt dabei, dass – zumindest bei hemianopen Affen - ein massiver selektiver pß- Ganglienzellverlust eintritt (Cowey et al., 1989). Wenn diese Degeneration auch auf Menschen zutrifft, könnte dieser Umstand – je nach dem, wohin diese Zellen direkt oder indirekt projizierten – eine Rolle spielen.

Die Lage ist also unklar; insbesondere das zuletzt genannte Ergebnis (kein Hemianopiker zeigte eine funktionale Asymmetrie) lässt die Kluft zwischen Befürwortern und Gegnern der Asymmetrie-Frage weit erscheinen. Weiter unklar - und meines Wissens nicht untersucht – ist neben der anatomischen und psychophysischen Frage die des Pupillenverhaltens. Konkret: Wie verhält sich der SPE bei Stimulation der unterschiedlichen Retinahälften? Wenn eine generelle anatomische Asymmetrie im extragenikulären visuellen System vorläge, müsste auch ein Unterschied in dem Pupillenverhalten bei häufigen bzw. seltenen Reizdarbietungen

[48] Das nasale Gesichtsfeld stimuliert die temporale Retinahälfte, das temporale Gesichtsfeld die nasale Retinahälfte.

[49] Wie die Variation von nasaler und temporaler auf ipsi- bzw. kontraläsionale Gesichtsfeldhälfte umgesetzt wurde, wird weiter unten erklärt.

offenbar werden, da auch die Pupillenweite eben von extragenikulären Strukturen (Edinger-Westphal-Kern) gesteuert wird.

Im kommenden Experiment wird HK mit derselben Reizkonstellation wie in der Gruppenstudie A1 konfrontiert, dieses Mal jedoch wird die temporale Retinahälfte (das nasale Gesichtsfeld) stimuliert. Aus der Gegenüberstellung der bereits vorliegenden Daten vom Entdeckungs-Experiment (A1) soll schließlich ermittelt werden, in wie weit ein psychophysischer und pupillometrischer Unterschied vorliegt.

5.3.2 A2: Hypothesen (2)

Die Entdeckungsleistung von Stimuli, die im blinden Feld präsentiert werden, liegt bei einer Stimulation der nasalen Retinahälfte höher als bei einer temporalen (gerichtete Hypothese auf Grundlage der Daten von Dodds, 2002). Pupillometrisch bildet sich außerdem ein quantitativ unterschiedlicher SPE aus (ungerichtete Hypothese aufgrund fehlender Vorkenntnisse).

5.3.3 A2: Trialaufbau und Versuchsdesign (2)

Das experimentelle Setting und der Trialaufbau sind identisch mit dem bereits durchgeführten Empfindungs-Experiment (A1), mit dem Unterschied, dass nun nicht das ipsiläsionale (rechte), sondern das kontraläsionale (linke) Auge abgedeckt wurde. Abbildung 25 veranschaulicht schematisch die Konsequenz des Augenklappenwechsels aus der Vogelperspektive: Im linken Gesichtsfeld erscheint eine graue Scheibe, wobei das rechte Auge zugedeckt ist (Abb.25a, angedeutet durch ein schwarzes Rechteck). Unter Fixierung des mittig gelegenen Fixationskreuzes kreuzt der visuelle Stimulus die Sehachse (schwarz gepunktete Linie) und fällt

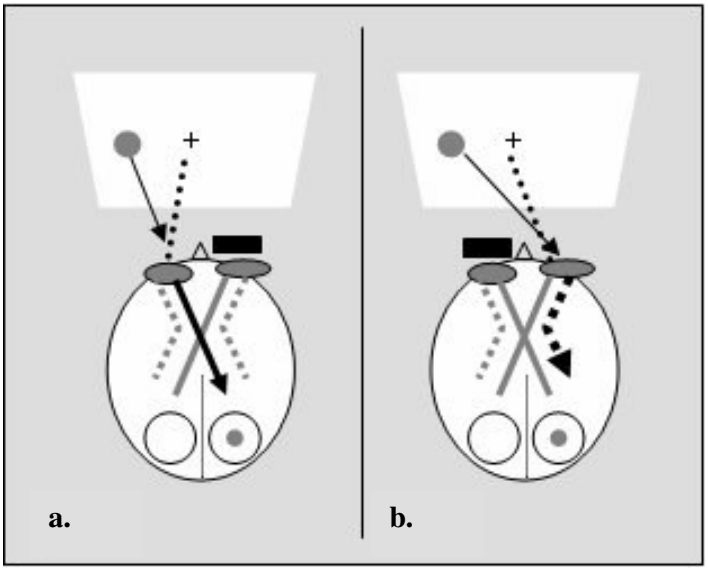


Abb. 25: Schematische Darstellung einer visuellen Stimulation durch eine graue Scheibe, die im linken Gesichtsfeld präsentiert wird, was in **a)** zu einer nasalen und in **b.)** zu einer temporalen Stimulation führt; siehe Text.

somit auf die nasale Retinahälfte. Nachdem eine erste retinale Verarbeitung stattgefunden hat, wird der Input auf die gegenüberliegende Seite projiziert (dicker, schwarzer, durchgezogener Pfeil), um in der rechten Hemisphäre weiter verarbeitet zu werden. Wenn nun – wie in Abbildung 25b – das linke Auge verdeckt ist, treffen die Stimulusinformationen auf den temporalen Retinaabschnitt (des anderen Auges). Auch hier wird der Reiz in die rechte Hemisphäre weitergeleitet, jedoch auf der ungekreuzten Bahn (dicker, schwarzer und gestrichelter Pfeil). Die zur Diskussion stehende Frage ist also, ob die beiden Projektionen, die in ein und dieselbe Hemisphäre projizieren (hier angedeutet durch den in **a.** durchgezogenen und in **b.** gestrichelten dicken Pfeilen) unterschiedliche Entdeckungsleistungen vermitteln.

Tab. 14: *Anzahl der durchgeführten Trials im 2. Teil der Einzelfallstudie*

	Nasale Retina-Stimulation		Temporale Retina-Stimulation	
Wahrscheinlichkeit	Target 20% *	Target 80%*	Target 20%	Target 80%
Gesundes Feld	200 Trials	200 Trials	200 Trials	200 Trials
Blindes Feld	600 Trials	600 Trials	600 Trials	600 Trials

* Die Daten wurden aus dem Empfindungs-Experiment (A1) übernommen.

Tabelle 14 zeigt die Anzahl der Trials, die HK in diesem Teil des Experimentes bearbeitete: Analog zu den experimentellen Daten, mit denen der Vergleich (nasal vs. temporal) angestrebt wird, richtet sich die Trialanzahl nach dem vorherigen Experiment. Zusätzlich wird das gesunde Feld stimuliert, um auch im normalsichtigen Bereich einen Einblick in mögliche pupillometrische Unterschiede zu erhalten.

5.3.4 A2: Ergebnisse (2)

Es werden nachfolgend die psychophysischen Ergebnisse nur für die blinde Seite präsentiert, da die Fehlerrate auf der gesunden unter 5% lag. Bei der Darstellung der pupillometrischen Daten und der Korrespondenz zur Psychophysik (5.3.6) beginnen wir mit den Pupillenreaktionen aus dem gesunden Feld, da sie Auskunft über das normale Pupillenverhalten geben können.

5.3.5 A2: Psychophysik (2)

Die Entdeckungsleistung im 2-AFC-Verfahren ist in Abbildung 26 für die blinde Seite graphisch dargestellt: Erkennbar ist, dass bei nasaler Retina-Stimulation die Entdeckungsleistung (Differenz zwischen *Treffer*- und *Falsch-Alarm*-Rate) mit ca. 65,3%-Punkte erheblich höher liegt als die bei temporaler (ca. 36,9%-Punkte). In der Target-80%-Bedingung ist die Entdeckungsleistung bei temporaler Retinastimulation mit 17,4 %-Punkte deutlich geringer als in den übrigen Bedingungen, was zu einem nicht unerheblichen Anteil auf einen mit 31,9% relativ hohen Anteil an *Falschen Alarm*en zurückzuführen ist. Alle vier beschriebenen Bedingungen ergeben im 4-Felder-χ^2-Test ein hoch signifikantes Ergebnis ($p<.001$), angedeutet durch drei Sternchen (***) in Abb. 26). In Tabelle 15 sind die einzelnen Prozentangaben einschließlich der dazugehörigen Trialanzahl zu sehen: Auffällig ist, dass die „nasale“ *Treffer*-Rate bei beiden untersuchten Target-Wahrscheinlichkeiten um ca. 20%-Punkte über der der temporalen liegt (83,3 zu 63,3 bzw. 70,6 zu 49,4%; fett gedruckt in Tab. 15).

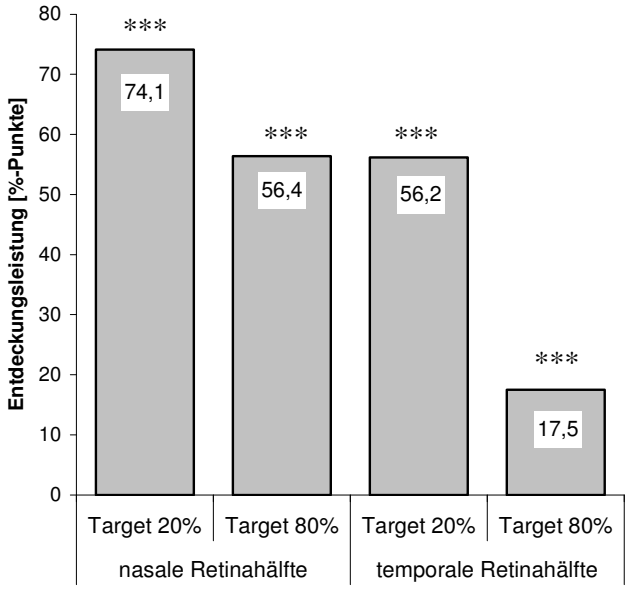


Abb. 26*: HKs Entdeckungsleistung (Treffer- minus Falsch-Alarm-Rate) in Abhängigkeit von der Target-Wahrscheinlichkeit und Stimulation der Retinahälften; *** = p<.001;siehe Text*

Tab. 15*: Anzahl der Trials einschließlich Prozentangaben (in Klammern) für den 2. Teil der Einzelfallstudie mit HK*

Nasale Retina	**Treffer**	F. Alarm	Verpasser	Korr. Zurückw.	Summe
Target 20% *	100 (**83,3%**)	44 (9,2%)	20 (17,7%)	436 (90,8%)	T:120; B: 480
Target 80% *	339 (**70,6%**)	17 (14,2%)	141 (29,4%)	103 (85,8%)	T:480; B:120
Temporale Retina	**Treffer**	F. Alarm	Verpasser	Korr. Zurückw.	Summe
Target 20%	76 (**63,3%**)	34 (7,1%)	34 (36,7%)	446 (92,9%)	T:120; B: 480
Target 80% **	224 (**49,4%**)	37 (31,9 %)	229 (50,6%)	79 (68,1%)	T:116; B: 453

* Daten wurden aus dem ersten Experiment (A1: „Empfindungs-Experiment“) übernommen
** Trialanzahl ist etwas reduziert, da ein Block aufgrund eines Hustenanfalls vorzeitig beendet werden musste.

Betrachten wir zunächst die Pupillen-Ergebnisse im gesunden Feld (Abb. 27): Hier zeigt sich beim Vergleich der Target-Wahrscheinlichkeiten (bei Stimulation innerhalb einer Retinahälfte), dass der jeweils selten dargebotene Stimulus – auch bei temporaler Retinastimulation - mehr Dilatationszuwachs im SPE-Zeitfenster verursacht als das häufig dargebotene Ereignis. Zwar zeigt der Vergleich von nasaler zu temporaler Retina-Stimulation in der Target-20%-Bedingung eine geringfügige Reduzierung von 0,49 z-Wert-Einheiten auf 0,33, dieser Abfall verläuft jedoch parallel zu den häufig dargebotenen Blank-Darbietungen, die mit Blick auf die Größenordnung eine vergleichbar geringere Pupillenweite (von 0,18 auf 0,05) aufweisen. In der Target-80%-Bedingung finden wir diesbezüglich keine Entsprechung, denn hier fällt bei der häufigen Target-Darbietung die Dilatation von 0,14 auf –0,10 ab, während das seltene Blank-Ereignis relativ stark von 0,48 auf 0,64 z-Wert-Einheiten ansteigt. Im MW-U-Test erweisen sich alle Vergleiche als hochsignifikant ($p<.01$), angedeutet durch zwei Sterne (**).

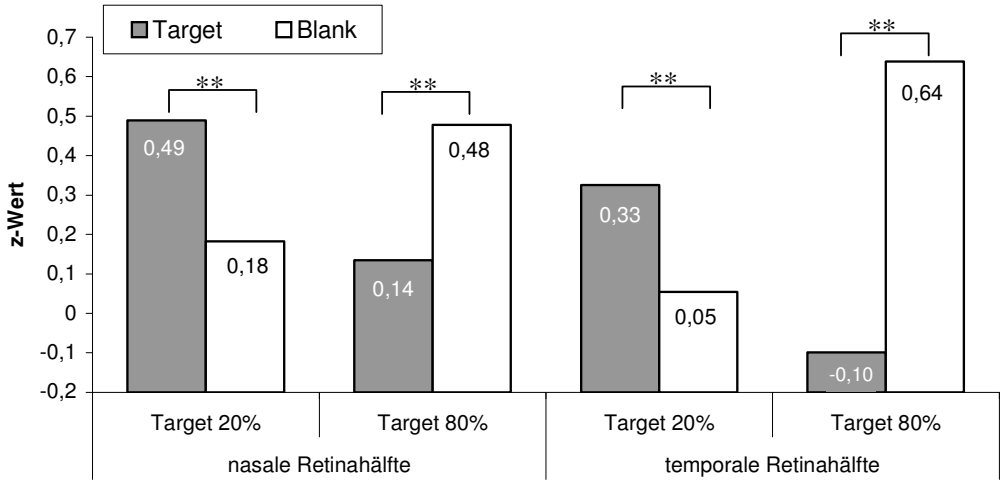


Abb. 27: *Gesundes Feld: Vergleich der Pupillendilatationen bei Stimulation der nasalen und temporalen Retinahälften für Target-20%- und Target-80%-Darbietungen.*

Kommen wir nun zu dem Pupillenverhalten bei Stimulation im blinden Feld, deren Ergebnisse in den Abbildungen 28a für ‚*Target'*- und in 28b für ‚*Blank'*-Antworten dargestellt sind: Ein erster Blick auf die Säulenhöhe lässt bei Target-Antworten (Abb.28a) stärkere Dilatationen vermuten als bei Blank-Antworten (Abb.28b); und tatsächlich liegen bei erstgenannter Antwort im Mittel 0,35 z-Wert-Einheiten vor, während zweitgenannte 0,23 Einheiten Dilatationszuwachs erreichen (unabhängig von der Retinahälfte und der Target-Wahrscheinlichkeit; in Abb. 28 nicht dargestellt). Die Pupillenreaktionen sind innerhalb der

Antworten je nach stimulierter Retinahälfte und Target-Wahrscheinlichkeit gruppiert. Zu erkennen ist in Abbildung 28a (linke Hälfte), dass Target-Trials in der Target-20%-Bedingungen (seltenes Ereignis) - sowohl bei nasaler als auch bei temporaler Stimulation – signifikant (MW-U-Test; p<.05, angedeutet durch *) mehr Dilatation nach sich ziehen als Blank-Trials (häufiges Ereignis). In den Target-80%-Bedingungen sollte sich (bei Vorliegen eines SPE) dieses Verhältnis umkehren: Wie bereits im Gruppenexperiment A1 (siehe Abb. 21 b. und d.) dargestellt, lag bei HK trotz hoher psychophysischer Entdeckungsleistung kein signifikanter SPE in der Target-80%-Bedingung vor (ns = nicht signifikant).[50] Es zeigte sich vielmehr ein gegenläufiger Trend, bei dem die seltene Reizdarbietung weniger Dilatation nach sich zog. Dieser Befund, der bei Stimulation der nasalen Netzhauthälfte auftrat, bestätigte und verstärkte sich hier: Die seltenen Blank-Darbietungen lagen auch hier 0,09 z-Wert-Einheiten *unter* denen der häufigen Target-Darbietungen (0,30-0,21).

Kommen wir zu HKs ‚*Blank'*-Antworten (Abb. 28b; rechte Hälfte): Auch in der temporalen

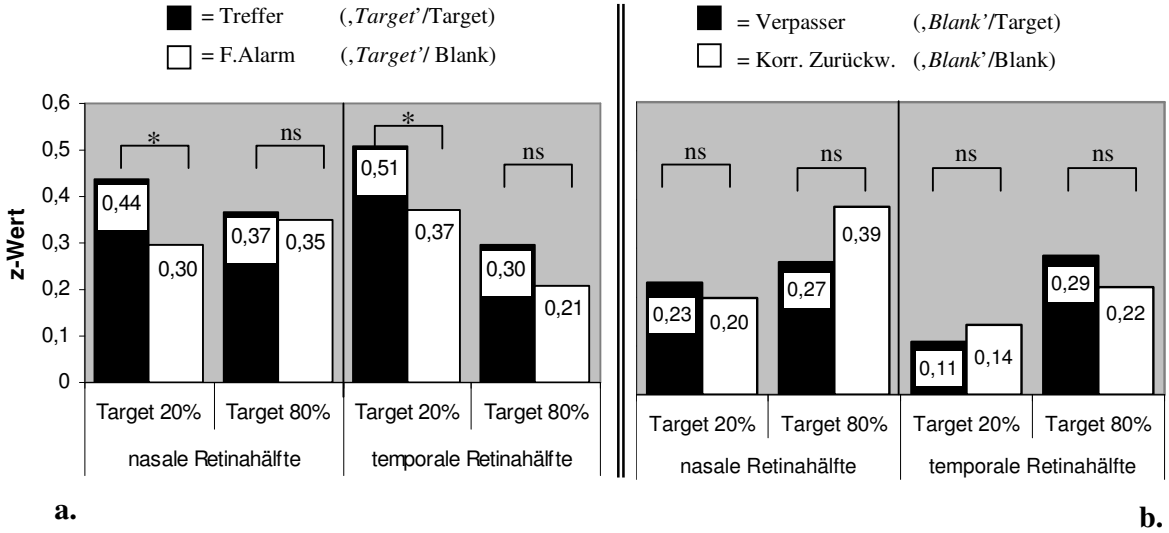


Abb. 28 a, b: *Blindes Feld: Pupillendilatationen für a. ‚Target'-Antworten und b.‚Blank'-Antworten in Abhängigkeit der stimulierten Retinahälfte und Target-Wahrscheinlichkeit; siehe Text.*

Retinahälfte blieb der stärkere Dilatationszuwachs in der Target-80%-Bedingung aus und sank mit 0,07 z-Wert Einheiten unterhalb der Target-Trials (0,29-0,22). Darüber hinaus zeigte auch die Target-20%-Bedingung nicht den stärkeren Zuwachs des seltenen Ereignisses: Die Target-20%-Durchgänge erreichten (nur) 0,11 z-Wert Einheiten, was nicht nur gegenüber den Pupillenreaktionen der häufigen Blank-Trials (0,14) vergleichsweise gering ist, sondern auch dem Pupillenverhalten in dem Antwort-Modus ‚Target' (mit 0,51) bei sonst gleichen

[50] Die Ergebnisse aus dem Experiment A1 wurden hier zum Vergleich nochmals aufgeführt.

Bedingungen heraus sticht. Die vier Vergleiche bei den Blank-Antworten waren ebenfalls nicht signifikant.

Es zeigte sich also, dass der signifikante SPE, der bei der Target-20%-Bedingung in der nasalen Retinahälfte aufgetreten war, *auch* bei temporaler Retinastimulation signifikant wurde. Ferner fiel auf, dass die Target-80%-Bedingung bei Target-Antworten als auch die Blank-Antworten per se (unabhängig von der Target-Wahrscheinlichkeit) keinen signifikanten SPE erzeugten. Die temporale und die nasale Stimulation blieb also auf SPE-Ebene ohne substanziellen Unterschied.

5.3.7 A2: Diskussion (2)

Bei Stimulation der blinden Seite sind in der psychophysischen Entdeckungsleistung sowohl bei nasaler als auch temporaler Retina-Stimulation hochsignifikante Entdeckungsleistungen aufgetreten. Das 2-AFC-Verfahren erwies sich somit über alle Vergleiche als sehr sensitiv. Dennoch lassen sich mit Blick auf die *Treffer*-Rate deutliche Unterschiede festmachen: Die *Treffer*-Rate bei nasaler Retina-Stimulation lag mit ca. 20 Prozentpunkten oberhalb der temporalen, während die *Falsch-Alarm*-Rate sich nur um ca. 2%-Punkte unterschied. Pupillometrisch zeigte sich, dass nur die Target-20%-Bedingung und in Kombination mit dem Antwort-Modus ‚*Target'* einen signifikanten SPE erbrachte. Diese Signifikanz war unabhängig von der stimulierten Retinahälfte vorzufinden; alle übrigen Vergleiche wurden nicht signifikant; somit entsprachen sich auch hier die Ergebnisse von temporaler zu nasaler Retina-Stimulation. Es zeichnet sich deswegen ab, dass nur ein psychophysischer Effekt zugunsten der nasalen Stimulation auftritt. Auch bei Stimulation des gesunden Gesichtsfeldes zeigten sich pupillometrisch keine nennenswerten Unterschiede; der SPE war bei Stimulation der nasalen Netzhauthälfte ebenso ausgeprägt wie bei der temporalen, hier allerdings in beiden Fällen signifikant.

Wie lässt sich die größere Sensitivität des 2-AFC-Rateverfahrens gegenüber der Pupillometrie (SPE) erklären? Aus der Neuroanatomie ist bezüglich der retrograden transneuronalen Degeneration bekannt, dass sich das Verhältnis von Pα-, Pß- und Pγ-Neuronen *vor* einer postgenikulären Läsion von annähernd 1:8:1 (Perry & Cowey, 1984) auf 1:1:1 *nach* der Läsion verändert (z.B. Cowey et al., 1989). Da der Edinger-Westphal-Kern (EW-Kern) jedoch in erster Linie von den Pα- und Pγ-Ganglienzellen, also nicht betroffenen retinalen Neurone gespeist wird, sollten vom neuroanatomischen Blickwinkel aus *gerade* die Pupillenreaktionen erhalten geblieben sein. Möglicherweise hat die Läsion aber auch zu umfangreichen Umstrukturierungen innerhalb des nachgeschalteten visuellen Nervensystems

geführt: Mögliche Strukturen wären zum einen die indirekte Verbindung von V1 über die Area pretectalis zum EW-Kern und zum anderen Ausfälle von extrastriären Strukturen wie V2, V3, V4 und MT, die direkt den EW-Kern innervieren (siehe Abb. 6).

Wenn man aber von einer asymmetrischen Verteilung von retinalen Ganglienzellen ausgeht, könnte sich einer selektive Degeneration der Pß-Zellen auch dadurch bemerkbar machen, dass - durch den selektiven Zelltod einer ohnehin „benachteiligten" Retinahälfte – nun eine reduzierte Entdeckungsleistung zutage trete. Diese Überlegung könnte zwar nicht die hier vorliegende Überlegenheit des 2-AFC-Verfahrens gegenüber des pupillometrischen Verfahrens erklären, möglicherweise aber dazu beitragen, warum ein naso-temporaler Unterschied in der Entdeckungsleistung vorliegt. Mit Blick auf die Ergebnisse von DODDS und Kollegen (2002), die ja auch einen psychophysischen Unterschied in einer 2-AFC-Entedeckungsaufgabe beschrieben haben, liegt jedenfalls eine Übereinstimmung der Ergebnisse vor. Die Tatsache, dass die Experimente zur *temporalen* Retina-Stimulation ca. vier Monaten nach denen der nasalen Stimulation erfolgten - und dazwischen einige andere Experimente durchgeführt wurden, von denen hier nicht berichtet wurde - kann insofern eine Erklärung für die Befunde bieten, als dass möglicherweise eine herabgesetzte Konzentration, Motivation bzw. ein verringertes Engagement vorgelegen haben mag, worauf aus Sicht des Untersuchers nichts hindeutete.

Problematisch erweist sich der Ergebnis-Vergleich zu den Experimenten von RAFAL et al. (1990) und WALKER et al. (2000), denn deren Befunde beziehen sich auf Sakkadenlatenzen, also psycho*physiologische* und nicht psycho*physische* Daten. Da sich sowohl die Verhaltens-, als auch die Pupillendaten auf der gesunden Seite nicht substanziell unterscheiden (das Target wurde hier fast immer gesehen und ein signifikanter SPE besteht in beiden Retinahälften), unterstützen die hier vorliegenden psychophysiologischen Daten (hier: SPE) die Ergebnisse der Arbeitsgruppe von WALKER (Sakkaden-Latenz) nicht, denn dort wurden ja nur bei gesunden Probanden ein naso-temporaler Unterschied festgestellt.[51] Die Frage zur naso-temporalen Asymmetrie muss also zunächst offen bleiben, wird jedoch in Experiment B1 nochmals mit normalsichtigen Probanden untersucht.

Was die Korrespondenz angeht fällt auf, dass der SPE besonders in der Target-80%-Bedingung ausbleibt, also bei HKs „schwächsten", aber immer noch hochsignifikanten Entdeckungsleistung (17,5%). Dass zwischen der psychophysischen (2-AFC) und pupillometrischen Entdeckungsleistung (SPE) ein Zusammenhang besteht ist daher – zumindest für HK in diesem Experiment – nahe liegend. Beachtenswert ist zudem, dass bei

[51] Ob sich (funktional oder anatomisch) das Sehen von normalsichtigen, hirngesunden Probanden von dem Sehen hemianoper Probanden im gesunden Feld unterscheidet, ist meines Wissens nicht geklärt.

temporaler Retina-Stimulation zwar ein Leistungsabfall von 20 Prozentpunkten aufgetreten ist, diese Minderung aber vergleichsweise gering ausfällt, wenn der SPE betrachtet wird, der de facto nicht mehr vorhanden ist. Hierfür könnten neben den bereits angesprochenen Degenerations-Prozessen auch Übungseffekte eine Rolle spielen, denn in früheren Experimenten und in Trainingseinheiten wurde bei HK fast ausschließlich die nasale Retinahälfte stimuliert. Es ist also denkbar, dass sich (im zentralen Teil) der nasalen Retinahälfte über Jahre hinweg ein effizienteres neuronales Netzwerk ausgebildet hat als die entsprechende temporale Retinahälfte des gewöhnlich verdeckten Auges.

Die Hypothese dieses Experimental-Teils (3), dass die Entdeckungsleistung bei einer Stimulation der nasalen Retinahälfte höher liegt als bei einer temporalen, kann aufgrund der quantitativen Entdeckungsleistung bestätigt werden, wobei beide Versuchsbedingungen (nasal und temporal) hochsignifikante Ergebnisse erzielten. Pupillometrisch bildete sich kein unterschiedlicher SPE aus, weswegen diese Alternativ-Hypothese zurückgewiesen werden muss.

5.4 A2: Einzelfall-Studie (Teil 3: Aufmerksamkeit)

5.4.1 A2:Einleitung (3)

In der Gruppenstudie A1 ergaben ‚Target'-Antworten in der Target-80%-Bedingung bei allen Patienten einen SPE, der bei 85% (sechs von sieben Patienten) signifikant ausfiel. In der anschließenden Diskussion wurde ein möglicher Einfluss der Aufmerksamkeit diskutiert. Inwieweit Aufmerksamkeitsprozesse tatsächlich einen Einfluss auf die Pupillenreaktion ausüben blieb offen. Aus bildgebenden Studien ist bereits bekannt, dass Aufmerksamkeit – hier verstanden als selektiver Mechanismus, der spezifische Aspekte aus der Umwelt hervorzuheben hilft[52] und somit eine erhöhte Verarbeitungstiefe bahnt – einen verstärkenden bzw. modulierenden Effekt auf neuronale Antworten haben kann (z.B. Büchel et al., 1998). BÜCHEL und Kollegen untersuchten Aufmerksamkeitseffekte bei der Bewegungswahrnehmung und fanden erhöhte hämodynamische Antworten nicht nur in kortikalen Regionen (okzipito-parieto–frontales System), sondern auch in subkortikalen thalamischen (medialer Thalamus) und kollikulären Strukturen (Colliculi superiores). Insbesondere die letztgenannten könnten – direkt oder indirekt - auch auf den EW-Kern Einfluss nehmen und somit bei der Vermittlung von Pupillenreaktionen einen modulierenden Einfluss ausüben. MCADAMS and MAUNSELL (2000) untersuchten den Einfluss von selektiver

[52] Angesichts der Fülle an Umweltreizen, ist eine Trennung von relevanten zu irrelevanten Informationen eine wichtige Aufgabe des Zentralnervensystems. Der mentale Prozess, der für diese Trennung verantwortlich ist, wird als selektive Aufmerksamkeit bezeichnet, um die es nachfolgend geht.

Aufmerksamkeit mit Blick auf Stimuli unterschiedlicher Wellenlänge und führten Einzelzellableitungen bei Makakenaffen durch: Auch hier zeigte sich, dass Aufmerksamkeitsprozesse die Feuerrate von wellenlängensensitiven V4-Neuronen erhöhten. In einer klassischen Studie von POSNER (1980) konnte ferner der Einfluss der Aufmerksamkeit auf Reaktionszeit und –genauigkeit dahingehend demonstriert werden, als dass schnellere bzw. akkuratere Reaktionen nachgewiesen wurden, nachdem ein kurz zuvor präsentierter valider Hinweisreiz die richtige Antwort gebahnt hatte. Wenn der Hinweisreiz jedoch invalide war, verlängerte sich die Reaktionszeit über das Maß hinaus, welches ohne jeden Hinweisreiz erzielt worden wäre.

CARRASCO und Kollegen (2004) untersuchten die phänomenale Erscheinung (appearence) von Gaborstimuli verschiedener Kontraststärken in Abhängigkeit von Aufmerksamkeit und kamen zu folgendem Schluss: „... attention alters appearence; it boosts the apparent stimulus contrast". Wenn Aufmerksamkeit tatsächlich die Sensitivität für Kontraste erhöhen kann, stellt sich auch für rindenblinde Patienten die Frage, ob eine erhöhte Sensitivität gegenüber visuellen Reizen im blinden Feld ermittelt werden kann. Um diese Frage experimentell anzugehen, wurde in diesem Teil 3 versucht, die Aufmerksamkeit zu variieren: HK erhielt die Instruktion, dass es sich um ein „passives Experiment" handele, in dem keine motorische Reaktion auf Stimuli gewünscht sei (siehe 5.4.3; Experimentelles Setting). Aufgrund von Studien von RICHER und Kollegen (1983) sowie RICHER und BEATTY (1985) musste allerdings mit einer geringeren Intensität der Amplitudenhöhe gerechnet werden, da in „go-Trials" ein stärkerer Effekt bekannt ist als in „no-go"-Trials. Ferner war mit Blick auf die „no-report"-Bedingung der HAKAREM & SUTTON-Studie (1966) zu überprüfen, ob die Durchgänge *ohne* Aufmerksamkeit auch *ohne* bzw. mit geringeren Dilatationen einhergehen würden.

5.4.2 A2: Hypothesen (3)

Dieser 3. Teil der Einzelfall-Studie mit HK hat zum Ziel, pupillometrische Antworten in Form des SPE einmal *mit* und einmal *ohne Aufmerksamkeit* zu untersuchen. Den genannten Voruntersuchungen zufolge, sollten sich in Durchgängen mit relativ hoher Aufmerksamkeit auf das blinde Feld stärkere SPE's zeigen als in Durchgängen ohne bzw. weniger Aufmerksamkeit. In Durchgängen mit gleichwahrscheinlicher Stimulus-Darbietung (Target-50%-Bedingung) ist ferner zu überprüfen, ob überhaupt eine Pupillenreaktion nach Target-Darbietung (z.B. als PLR) auftritt.

5.4.3 A2: Experimentelles Setting (3)

Der Trialaufbau ist identisch mit den bereits vorausgegangenen Experimenten (A1, A2 Teil 1 und 2), mit dem Unterschied, dass HK instruiert wurde, nicht zu antworten. Es handelte sich also - mit Blick auf die motorische Antwort - um eine **passive Versuchsbedingung**, wobei HK in dem einen Teil des Experimentes („Aufmerksamkeits-String“) darum gebeten, seine Aufmerksamkeit in vollem Umfang auf das blinde Feld zu richten und (gedanklich) so zu verfahren, als ob er – wie zuvor auch – sich für den Stimulus ‚Blank’ oder ‚Target’ entscheiden müsse. Bis auf die motorische Ausführung der Antwort verlief ein Trial also genau so wie in den vorherigen Experimenten auch. Lediglich am Ende eines Durchganges (nach 100 Trials) wurde HK gebeten, eine Einschätzung über das Target-Blank-Verhältnis abzugeben. In der zweiten Bedingung („Unaufmerksamkeits-String“) wurde HK instruiert, nur das Fixationskreuz zu fixieren und ansonsten gedanklich vollkommen abzuschalten. Dabei sollte er emotionales und kognitiv stark involvierendes Gedankengut ebenso vermeiden wie motorische Reaktionen, damit ein Vergleich zu den Pupillendaten des Aufmerksamkeit-Strings gezogen werden konnte. Tabelle 16 zeigt die Anzahl der Trials, die HK für diesen 3.Teil des Experimentes A2 bearbeitete:

Tab. 16: *Anzahl der durchgeführten Trials im 3. Teil der Einzelfallstudie*

Passive Bedingungen	Target 20%	Target 50%	Target 80%
Aufmerksamkeits-String	200 Trials	200 Trials	200 Trials
Unaufmerksamkeits-String	200 Trials	200 Trials	200 Trials

Es wurde ausschließlich das kontraläsionale Auge (nasale Retinahälfte) untersucht. Die Trialabfolge war pseudorandomisiert. Ein Trial dauerte 3000 ms: 500 ms zwischen Hinweisreiz und Stimulus onset; 306 ms Stimulus und die restlichen 2194 ms waren gefolgt von einem (leeren) weißen Bildschirm. Das Fixationskreuz war immer vorhanden. HK hatte in beiden Strings keine Information zum Target-Blank-Verhältnis. Zuerst erfolgten die Target-20%-, dann die Target-80%- und zuletzt die Target-50%-Durchgänge, wobei „unaufmerksame“ Durchgänge meist am Ende einer Sitzung erfolgten (siehe Diskussion).

5.4.4 A2: Ergebnisse (3)

Da es sich um Durchgänge handelte, die per Instruktion keine motorische Reaktion vorsahen, haben wir keine Möglichkeit, Verhaltensdaten auszuwerten. Allerdings liegen für die Durchgänge im Aufmerksamkeits-String die jeweiligen Schätzungen zur Target-Wahrscheinlichkeit vor: In sechs Durchgängen verschätzte sich HK um maximal 15

Prozentpunkte von der tatsächlich dargebotenen Target-Wahrscheinlichkeit.[53] Zwei Mal traf er genau das richtige Verhältnis, wobei ihm aus Vorexperimenten Target-Wahrscheinlichkeiten von 10, 20, 35, 50, 65, 80 und 90% bekannt waren. Kommen wir zu den Pupillenreaktionen. Abbildung 29 zeigt den Verlauf der Pupillenweite nach Stimulus onset.

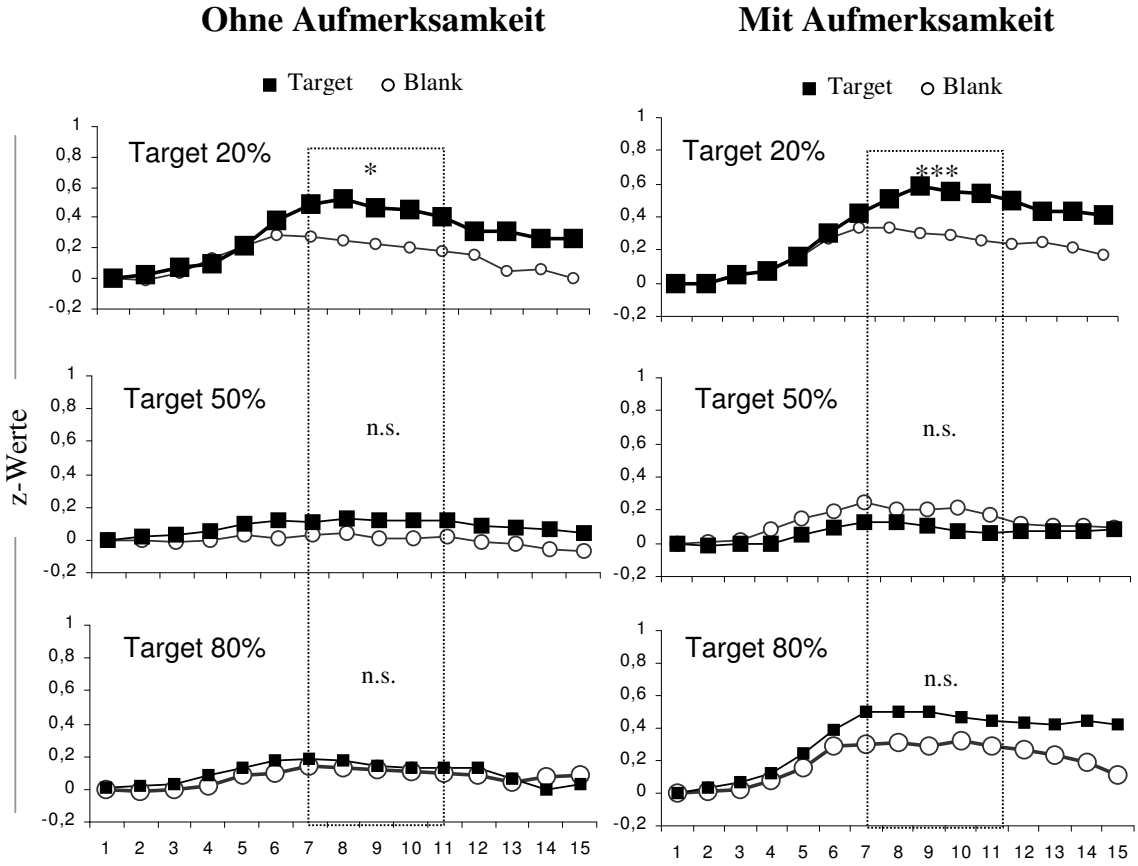


Abb. 29: *HKs Pupillenreaktionen bei Darbietung von Target- und Blank-Reizen; große Symbole zeigen das seltene, kleine das häufige Ereignis; zusätzlich weisen schwarz ausgefüllte Symbole auf eine Target-, weiß ausgefüllt auf eine Blank-Präsentation hin. Die Graphik zeigt, dass in der 20%-Bedingung (obere Reihe) die seltene Target-Darbietung mehr Dilatation als die häufige Blank-Darbietung macht, unabhängig von der Instruktion (mit bzw. ohne Aufmerksamkeit). In der mittleren Reihe zeigen sich nur wenig Dilatationen. In der unteren Reihe (Target-80%) zeigen sich ohne Aufmerksamkeit kaum Pupillenreaktionen, mit Instruktion weisen die häufigen Target-Darbietungen einen stärkeren Effekt auf. Der umrahmte Bereich gibt das SPE-Zeitfenster von 751-1150 ms wieder; *** p<.000; * p<.016; n.s. nicht signifikant; siehe Text.*

HKs Pupillenreaktionen sind in der Amplitudenhöhe der Target-20%-Bedingung vergleichbar mit der der aktiven Bedingung (siehe Abb. 20; sie erreichen einen z-Wert von ca. 0,6

[53] Beispiel: Wenn ein Durchgang mit einer Target-20%-Wahrscheinlichkeit erfolgte, lag sein Tipp immer zwischen 5% und 35%; bei einer Target-80%-Wahrscheinlichkeit lag er zwischen 95% und 65%.

Einheiten). Dies trifft für die Bedingung *mit* und *ohne* Aufmerksamkeit zu. Es zeigt sich ferner ein signifikanter SPE in den Durchgängen *ohne* Aufmerksamkeit (MW-U-Test; p<.016) und ein hochsignifikanter in jenen *mit* Aufmerksamkeit (p<.000). Die gleichwahrscheinliche Darbietung von Target und Blank zeigt vergleichsweise geringe und nicht signifikante (n.s.) Dilatationen: Sowohl in der frühen Phase (bis 500ms post onset) als auch in der späten (nach 500ms post onset) zeichnen sich hier keine nennenswerten Differenzen im Kurvenverlauf ab. In der Target-80%-Bedingung bleibt der SPE gänzlich aus: In Durchgängen *ohne* Aufmerksamkeit gleicht der Kurvenverlauf dem der gleichwahrscheinlichen (Target-50%)-Bedingung, in solchen *mit* Aufmerksamkeit überwiegt (sogar) das häufige Ereignis, also die Target-Darbietung (n.s.).

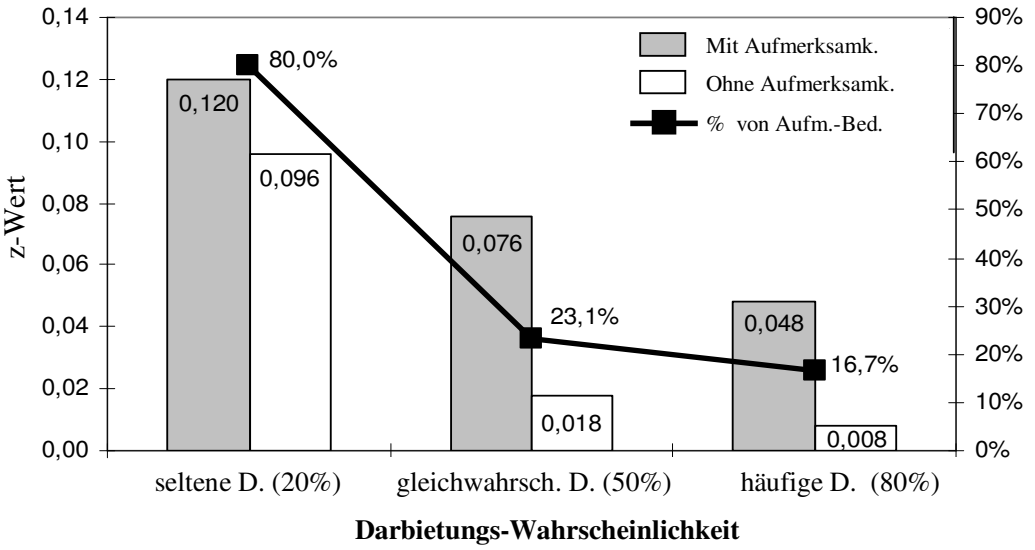


Abb. 30*: HKs Zuwachs der Pupillenweite von Pre-SPE- zu SPE-Zeitfenster in Abhängigkeit von der Darbietungshäufigkeit. Graue Säulen geben den Zuwachs der Durchgänge wider, in denen HK seinem blinden Feld volle Aufmerksamkeit widmen sollte, weiße Säulen stellen die analogen Zuwächse für „unaufmerksame" Durchgänge. Die Schwarze Linie (mit Quadraten) gibt den Prozentanteil wider, den der Pupillenzuwachs der „unaufmerksamen" Trials von „aufmerksamen" erreicht; siehe Text.*

Die Daten wurden in drei Wahrscheinlichkeits-Kategorien zusammengefasst: in seltene, in gleichwahrscheinliche und häufige Ereignisse. In die Kategorie der seltenen Ereignisse wurden die Pupillenreaktionen der Target-Darbietungen aus der Target-20%- sowie die der Blank-Darbietungen aus der Target-80%-Bedingung zusammengefasst und gemittelt. Analog dazu wurden die gleichwahrscheinlichen und häufigen Ereignisse gemittelt. Das Ergebnis der Differenzen von dem SPE-Zeitfenster (751-1150 ms) zum Prä-SPE-Zeitfenster (351-750ms)

ist in Abbildung 30 zu sehen:[54] Erkennbar ist, dass der Pupillenzuwachs im SPE-Zeitfenster in den Durchgängen des Aufmerksamkeit-Strings (graue Säulen) konsistent höher liegt als in denen des Unaufmerksamkeit-Strings (weiße Säulen). Wie viel Prozent des Pupillenzuwachses erreichen die „unaufmerksamen" von den „aufmerksamen" Durchgängen? In der Kategorie „seltene Darbietung" nimmt die Pupillenweite 0,096 z-Wert-Einheiten zu, was ca. 80% dessen ist, was die „aufmerksamen" Durchgänge erzielten (0,120 z-Wert-Einheiten). In der Kategorie „gleichwahrscheinliche Darbietung" sind es noch 23,1% und bei der häufigen Darbietung 16,7%. Somit erscheinen die 50%- und 80%-igen Darbietungen in stärkerem Maße von „unaufmerksamen" Durchgängen betroffen zu sein als die 20%-igen.

5.4.5 A2: Diskussion (3)

HK schätzte von sechs Durchgängen zwei in der Target-Wahrscheinlichkeit richtig und die übrigen mit max. 15%-Punkte Abweichung von der tatsächlichen Target-Wahrscheinlichkeit ein. Dieses recht grobe Maß lässt vermuten, dass er seine Aufmerksamkeit wirklich auf die Entdeckung von Targets gelenkt hat und - wie in den vorausgegangenen Experimenten auch - psychophysisch ein vergleichbar gutes Ergebnis hätte erzielen können. Den Kurvenverlauf betrachtend finden wir auch hier keine frühen Pupillenreaktionen: Die Pupille scheint auf die Luminanzabnahme, die während der Target-Darbietung auftritt, nicht zu reagieren. In der Target-20%-Bedingung finden wir einen signifikanten SPE vor, in den 50%- und 80%-Bedingungen nicht. Mit Blick auf die Kategorien „seltene, gleichwahrscheinliche und häufige Darbietung" sehen wir in dem gemittelten Säulendiagramm der Target-20%-Bedingung einen eher geringfügigen Unterschied im Dilatationszuwachs: Hier erreichen die „unaufmerksamen" Durchgänge ca. 80% dessen, was die „aufmerksamen" erreichen; in der gleichwahrscheinlichen und häufigen Darbietungs-Kategorie sind es ca. 23,1% bzw. 16,7%.

Beginnen wir die Diskussion mit Überlegungen zum PLR: Dass der PLR auch in Durchgängen mit gleichwahrscheinlicher Stimulus-Darbietung ausbleibt, bestätigt den Befund aus dem Experiment A1, in dem vermutlich der Kontrast und/oder die Luminanzveränderung für einen PLR zu gering war. Dass jedoch in der Target-20%-Bedingung eine signifikant stärkere Dilatation bei seltenen Reizen auftrat, kann prinzipiell auch als Summationseffekt von PLR (graue Scheibe führt zur Luminanzabnahme) und SPE (graue Scheibe ist der seltene Reiz) verstanden werden. Danach wäre die stärkere Dilatation der häufigen Targets in der Target-80%-Bedingung, die in diesem Experiment deskriptiv (aber n.s.) vorgelegen hat, *auch* als PLR interpretierbar, wogegen allerdings die hohe Latenz (> 500 ms) spricht, mit der die

[54] Die Berechnung erfolgte wie in Experiment A1.

Reaktion einsetzte. Insgesamt erscheint der hier verwendete Stimulus wenig geeignet, Reaktionen aufgrund von Leuchtdichteveränderungen hervorzurufen. Von Vorteil ist das hier insofern, als ein möglicher SPE nicht durch einen Pupillenlichtreflex beeinflusst wird, zumal ein schwacher Reiz für den Nachweis des SPE gerade richtig sein könnte (vgl. Hakarem & Sutton, 1966).

Zum Pupillenverhalten der Target-20%-Durchgänge: Mit Blick auf den hier untersuchten SPE verbuchten wir sowohl für die „aufmerksamen" als auch für die „unaufmerksamen" Durchgänge einen signifikanten SPE, dessen P-Wert im erstgenannten Setting noch niedriger lag bzw. hochsignifikant war ($p<.001$). Aufgrund der SUTTON & HAKAREM-Studie (1966, keine Pupillenreaktion in der „no-report"-Bedingung) war in den Durchgängen „ohne Aufmerksamkeit" nicht mit einem SPE zu rechnen, *sofern* – und dies ist hier nicht eruierbar - HK wirklich seine Aufmerksamkeit abzulenken vermochte. Denkbar wäre nämlich, dass er aufgrund vieler Übungsstunden die Instruktion, sich abzulenken, nicht konsistent über den gesamten Versuchsdurchgang „durchgehalten" hat. Als Folge könnte sich dann ein abgeschwächter SPE zeigen, wie er ja tatsächlich auch mit einem P-Wert kleiner als 0,05 (exakt: 0,016) aufgetreten ist. Was die Amplitudenhöhe angeht entspricht das Pupillenverhalten der Target-20%-Darbietung mit ca. 0,6 z-Wert-Einheiten in etwa dem der Versuchsreihe *mit* motorischer Antwort (Exp. A1). Gemäß den Vorbefunden von RICHER und Kollegen (1983, 1985) hätten wir jedoch einen stärkeren Effekt im Experiment A1 erwartet, da „go-Trials" mehr Aktivität auslösten als „no-go-Trials". Dass HK auch in dem jetzigen Experiment vergleichbar hohe z-Werte erreicht hatte, könnte daran gelegen haben, dass der gut untersuchte und viel trainierte Patient HK eine für ihn ungewohnte Instruktion erhielt: nämlich die *Unterdrückung* einer Reaktion (hier: des Tastendrucks). Möglicherweise war die motorische Reaktion auf Stimuli im blinden Feld so eingeübt, dass die *Hemmung* des Tastendrucks auf neuronaler Ebene einer aktiven motorischen Bedingung entsprach. Nach den Befunden von BÜCHEL und Kollegen (1998; Aufmerksamkeitsprozesse modulieren die Aktivität des mediales Thalamus und des Colliculus superior) und von MCADAMS and MAUNSELL (2000; höhere Feuerrate bei Einzelzellableitungen) wäre allerdings in „unaufmerksamen" Durchgängen eine niedrigere Amplitude zu erwarten gewesen. Eine Alternativerklärung für das Ausbleiben liegt neben der bereits angesprochenen ungewohnten Instruktion bzw. möglicherweise problembehafteten Umsetzung derselben in der Abfolge: Um nämlich einen häufigen Wechsel von „aufmerksamen" und „unaufmerksamen" Durchgängen und somit eine Konfusion zu vermeiden, wurden die letztgenannten immer zusammen und am Ende einer Sitzung präsentiert: Diese Vorgehensweise ist insofern

problematisch, als dass zuerst durchgeführte Durchgänge möglicherweise stärkere Pupillendilatationen hervorbringen könnten als zuletzt durchgeführte, in denen das Nervensystem des Patienten vielleicht weniger effizient arbeitete (z.B. Ermüdung) oder sich an die Reizkonstellation gewöhnt hatte (Habituation). Um eine solche Beeinflussung gering zu halten, wurden die experimentellen Sitzungen auf maximal eine Zeitstunde (einschließlich Pausen) beschränkt, was für HK, der ansonsten wöchentlich drei Zeitstunden experimentelles Arbeiten gewohnt ist, eine nicht zu große Anstrengung darstellen dürfte. Insgesamt können wir für die Target-20%-Bedingung festhalten, dass sich erstens die experimentelle Variation (*mit* und *ohne* Aufmerksamkeit) nicht in großem Umfang auf das Pupillenverhalten ausgewirkt hat und zweitens ein signifikanter SPE auftrat, der dem der aktiven Bedingungen (Experiment A1) in Amplitudenhöhe und Verlauf vergleichbar ist. Ob sich das Erscheinungsbild des Targets – wie es CARRASCO und Kollegen (2004) beschrieben haben – durch die Aufmerksamkeitsmodulation verändert hat, lässt sich nicht beantworten, da keinerlei Maß für den Grad der visuellen Bewusstheit vorliegt.

In den Target-80%-Durchgängen blieb der SPE aus. Dieser Befund trifft für „aufmerksame" Durchgänge noch mehr zu als für „unaufmerksame": In erstgenannten liegt nämlich ein gegenteiliger Effekt vor, in letztgenannten bleibt die Pupillenreaktion mehr oder weniger aus. Dass in „aufmerksamen" Durchgängen ein inverser SPE auftrat, erinnert an die Befunde aus dem Experiment A1, in dem HK in der Target-80%-Bedingung zwar psychophysisch der erfolgreichste Patient war, pupillometrisch aber der einzige, der keinen signifikanten SPE aufwies. Auch hier (Target-80%-Durchgänge) zeigt das Target, dessen Darbietung das häufige Ereignis darstellt, einen stärkeren Effekt als der seltene Blank-Reiz. Ohne empirische Evidenz vorweisen zu können, könnte der jetzige Befund wiederum mit einer leicht überschwelligen Reizverarbeitung in Verbindung stehen, deren Gewahrwerden einen möglicherweise stärkeren Einfluss auf die Pupille ausübt als die Auftretenswahrscheinlichkeit (vgl. Diskussion im Exp. A1). Von der Target-50%-Bedingung war a priori kein SPE zu erwarten. Pupillendilatationen, die auftreten würden, sollten darum eher mit den physikalischen Reizeigenschaften in Verbindung gebracht werden. Wie sich zeigte blieb in beiden Bedingungen („aufmerksam" und „unaufmerksam") ein substanziell unterschiedlicher Kurvenverlauf aus. Dass es dennoch zu einer geringfügigen Dilatation kommt, könnte mit einer unspezifischen leichten Erregung aufgrund des akustischen Hinweistons begründet sein. Dieser Punkt wird u.a. in der Allgemeinen Diskussion noch angesprochen.

6.0 Experimental-Phase B

6.1 B1: „Entdeckungs-Experiment"

In dem kommenden Experiment wurden normalsichtige Probanden untersucht. Um diese Daten mit denen der rindenblinden Patienten vergleichen zu können, wurden der gleiche Stimulus und die gleichen Luminanzeigenschaften des Reizes und des Hintergrundes verwendet. Allerdings war es nötig, den Reiz (graue Scheibe; Abb. 31a) so zu präsentieren, dass er nur schwer bewusst erkennbar war. Eine Reduzierung der Darbietungszeit allein genügte – eigenen Voruntersuchungen zufolge - nicht, denn selbst bei einer 12 ms währenden Präsentation wird das Gewahrwerden der grauen Scheibe und somit eine hohe psychophysische Entdeckungsleistung nicht verhindert. Es bedurfte einer Maske, die dem Stimulus zeitlich nachgeschaltet war (backward masking). Hierzu wurde in Anlehnung an das „Meta-Kontrast-Paradigma" von NEUMANN und KLOTZ (1994) den Probanden nach Darbietung der grauen Scheibe ein weiterer Stimulus präsentiert, der in Abbildung 31b abgebildet ist: Zu sehen ist ein schwarzes Quadrat, das in der Mitte eine weiße Aussparung aufweist; diese Aussparung entspricht in Form und Durchmesser genau der grauen Scheibe. Das schwarze Quadrat samt Aussparung – fortan als Maske bezeichnet – wird nun im Experiment genau dorthin platziert, wo zuvor die graue Scheibe erschienen war. Dadurch wurde ein nachgeschalteter Kontrast erzeugt, der diesem Paradigma den Namen gegeben hat (griech: meta. ~ nach, hinter). Diese Aneinanderreihung macht die nur für Bruchteile einer Sekunde dargebotene graue Scheibe schwer erkennbar. Weiterhin wurden die Reize peripher und monokular dargeboten und mit einer 2-AFC-Entdeckungsaufgabe verknüpft. Durch die periphere Darbietung stellte sich nun die Frage, ob möglicherweise Unterschiede in der Entdeckungsleistung bei links- bzw. rechtsseitiger Gesichtsfeldstimulation auftreten würden. Diese Frage ist insofern wichtig, als dass Patienten, die entweder eine links- oder rechtshemisphärische Läsion haben, möglicherweise in Blindseh-Funktionen unterschiedliche Voraussetzungen mitbrächten. Zum Thema der Hemisphärenspezifität bzw. –asymmetrie finden sich bereits zahlreiche Studien (vgl. Springer & Deutsch, 1998): Während der linken Hemisphäre tendenziell eher numerisches und symbolhaftes Denken sowie komplexe willentlich kontrollierte Bewegungen zugeschrieben werden, zeigt sich die rechte Hemisphäre überlegen in den Bereichen von Melodien, nicht-verbalen räumlichen Funktionen und der

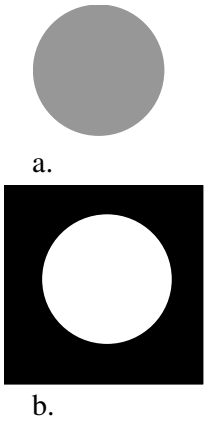


Abb. 31. **a***: Stimulus in Form einer grauen Scheibe;* **b***: Maske als schwarzes Quadrat mit Aussparung in Größe des Stimulus*

Aufmerksamkeit. Auf *Strategien* der Hemisphären blickend werden der linken Hemisphäre eher analytisches, serielles, detailliertes, zeitliches, abstraktes und logisches Denken zugesprochen. Die rechte Hemisphäre ist bei Aufgabenstellungen im Vorteil, in denen eher synthetisches, gleichzeitiges, holistisches, räumliches, konkretes und evt. gefühlsorientiertes[55] Denken ausschlaggebend ist. Wie dem auch sei, anhand der zuletzt genannten Strategien können wir keine gerichtete Hypothese dahingehend formulieren, dass die psychophysische oder pupillometrische Entdeckungsleistung in einem Gesichtsfeld besser ist als in dem anderen.

Schließlich wird zu überprüfen sein, ob die Lokation der retinalen Stimulation (nasal vs. temporale Retinahälfte) einen Einfluss auf die Entdeckungsleistung ausüben kann: Im 2. Teil der Einzelfallstudie (A2), in dem bei HK die naso-temporale Asymmetrie untersucht wurde, ging eine mit Blick auf die Treffer-Rate 20%-Punkte ausmachende Abnahme der immer noch signifikanten psychophysischen Leistung mit keinem substanziellen Unterschied des SPEs (nasal vs. temporal) einher. Es wird darum bei der normalsichtigen Stichprobe zu prüfen sein, ob dieser Befund auch bei hirngesunden Probanden eine Entsprechung findet.

6.1.1 B1: Hypothesen

Wenn ein visuelles Target peripher, monokular und schwellennah präsentiert wird, erzeugt es bei selten dargebotenen Reizen eine stärkere Pupillendilatation als wenn dieselben Reize häufig dargeboten werden (gerichtete Hypothese). Darüber hinaus wird untersucht, ob die psychophysische oder pupillometrische Entdeckungsleistung für die Stimulation der Gesichtsfelder unterschiedlich ist (ungerichtete Hypothese). Schließlich werden die erhobenen Daten darauf hin analysiert, ob Probanden, deren nasale Retinahälfte untersucht wurde, bessere Entdeckungsleistungen aufweisen als temporal stimulierte (gerichtete Hypothese).

6.1.2 B1: Stichprobe und Untersuchungszeitraum

Insgesamt wurden 20 Vpn getestet, wovon zwölf männlich und acht weiblich waren. Dabei handelte es sich überwiegend um Studierende, die freiwillig und ohne finanzielle Anreize an dem Versuch teilnahmen. Das durchschnittliche Alter betrug 27 Jahre (Spannweite: 19-50 Jahre). Es wurden wegen der Fragestellung zum Einfluss der primär stimulierten

[55] Bei der Frage, ob das Gefühlsleben lateralisiert ist, stehen sich zwei Theorien gegenüber: die *Valenzhypothese* und die *Rechte-Hirn-Hypothese*. Nach Studien von RICHARD DAVIDSON (z.B. Davidson & Tomarken, 1989) gilt für die *Wahrnehmung* von Gefühlen die Rechte-Hirn-Hypothese, für das Erleben, d.h. die *Produktion* von Gefühlen die *Valenz-Hypothese*, wobei der linken Hemisphäre das Erleben von positiven und der rechten das von negativen Gefühle zugesprochen wird.

Hemisphäre[56] nur Rechtshänder zugelassen. Ferner nahmen nur Frauen an dem Experiment teil, die Antikonzeptiva einnahmen, da möglicherweise eine von der Zyklusphase abhängige Hormonlage Aufmerksamkeit[57] und Hemisphärenasymmetrie (Hausmann & Güntürkün, 2000) modifiziert, was die psychophysischen und pupillometrischen Daten konfundieren könnte. Die Vpn wurden nach Alter, Geschlecht und stimulierter Retinahälfte gematcht. Bei allen Vpn wurde die Sehschärfe bestimmt und Angaben zum allgemeinen Befinden sowie Gesundheitszustand erhoben. Eventuell bestehende Sehschärfendefizite wurden mit Brille oder Kontaktlinsen ausgeglichen, wobei die Sehschärfe bei mindestens 0,8 lag.[58] Alle Probanden waren nach eigenen Angaben frei von psychiatrischen und neurologischen Erkrankungen. Das Experiment dauerte pro Vp 60 Minuten, wovon ca. zehn Minuten für die Erhebung von Fragebogen-Daten verwendet wurden.
Die Untersuchungen wurden zwischen Mai und Juni des Jahres 2004, in der Zeit von 9 bis max. 18 Uhr, nur wochentags durchgeführt.

6.1.3 B1: Versuchsdesign und Trialaufbau

Es handelte sich um einen gematchten Versuchsplan, bei dem die Vpn nach Alter (+/- 5 Jahre) und Geschlecht (♀:♀ und ♂:♂) ausgewählt wurden. Primär untersucht werden sollten der Einfluss der Stimulus-Wahrscheinlichkeit (UV1: 20% vs. 80%) und der der stimulierten Gesichtsfeldhälfte (UV2: linkes vs. rechtes Gesichtfeld) sowie der Retinahälfte (UV3: nasal vs. temporal). Als abhängige Variablen dienten die psychophysische Entdeckungsleistung, definiert als *Treffer*- minus *Falsch-Alarm*-Rate (AV1) und die aktefaktbefreite z-transformierte Pupillenweite im SPE-Fenster (AV2). Tabelle 17 zeigt die sich daraus ergebenden zwei Gruppen von je zehn Vpn für den Hemisphärenvergleich. Dieselben Vpn wurden in

Tab. 17: *Zuordnung von Versuchspersonen in jeweilige experimentelle Anordnung; hier hemisphärenspezifisch*

Linke Hemisphäre		Rechte Hemisphäre		Summe
nasal	temporal	nasal	temporal	
5 Vpn	5 Vpn	5 Vpn	5 Vpn	20 Vpn
10 Vpn		10 Vpn		20 Vpn

[56] Es lässt sich zwar diskutieren, dass die Informationen lateralisierter Stimuli über transhemisphärische Verbindungen (z.B. Corpus Callosum) letzten Endes in beide Hemisphären gelangen, jedoch kommt sie in einer Hemisphäre zuerst an und wenn diese den jeweiligen Reiz schneller verarbeitet und weiterleitet als die andere, kann durchaus von funktionellen Asymmetrie gesprochen werden (vgl. Springer und Deutsch, 1998, S.82).
[57] Derzeit untersucht die Dipl.-Psych. V. Walpurga an der Uni Düsseldorf (Exp. Psychologie II, Abt. für Psychoendokrinologie), ob die Östrogen-Konzentration Auswirkungen auf allgemeine Aufmerksamkeitsprozesse hat.
[58] Die Sehschärfe spielte hierbei eine untergeordnete Rolle, da die Entdeckungsleistung nicht so sehr von der Sehschärfe abhing.

entsprechender Weise für den naso-temporalen Retinavergleich gegenübergestellt. Um die Experimente nicht zu lang werden zu lassen, wurde auf ein Messwiederholungs-Design verzichtet: Jede Versuchsperson erhielt zu Beginn des Experimentes ein experimentelles „Skript" vorgelegt, das bezüglich der Kriterien *Alter*, *Geschlecht* und *retinaler Stimulation* einer anderen Vp entsprach, so dass zur Untersuchung sowohl der Hemisphären- als auch Retinaunterschiede je ein gleichgeschlechtliches und -altes homologes Vpn-Paar zur Verfügung stand.

Woraus bestand nun ein Skript? Ein Skript enthielt neben einem Übungsteil zwei Blöcke: in einem erschien das Target in 20% und im anderen in 80 %, andernfalls kam ein Leerreiz (Blank). Die Abfolge der zwei Blöcke war weitestgehend ausbalanciert, wobei zwölf Vpn mit Block 1 und acht mit Block 2 begannen.[59]

In Tabelle 18 sind die vier Skripte (spaltenweise) mit den je zwei Experimentalblöcken bzw. dem darin enthaltenen Trial-Umfang aufgeführt.

Tab. 18: *Versuchsdesign Experiment A2 „Entdeckungs-Experiment"; angegeben ist die absolute Anzahl der Trials, die jede Versuchsperson in den jeweiligen Skripten (~Zeilen) in den beiden Blöcken bearbeitet hat.*

Skripte	**Block 1: Target 20%**	**Block 2: Target 80%**	**Trials insgesamt**
Linke Hemisphäre nasal	192 Blank / 48 Target	48 Blank / 192 Target	480 (2x240)
Rechte Hemisphäre nasal	192 Blank / 48 Target	48 Blank / 192 Target	480 (2x240)
Linke Hemisphäre temporal	192 Blank / 48 Target	48 Blank / 192 Target	480 (2x240)
Rechte Hemisphäre temporal	192 Blank / 48 Target	48 Blank / 192 Target	480 (2x240)

Alle Trials begannen mit einem akustischen Hinweisreiz (500 Hz; ~40 dB), der wie im Experiment zuvor sowohl als Trigger als auch als Hinweisreiz für die Vp fungierte. Um die Entdeckung des Targets zusätzlich zu erschweren, erfolgte in jedem Trial eine beidseitige Stimulation: Wenn beispielsweise eine Vp das Skript „Linke Hemisphäre nasal" bearbeitete, erhielt sie die Instruktion, nur auf die rechte Seite zu achten (nicht zu blicken) und nach jedem Trial zu entscheiden, ob die graue Scheibe vor der Maske erschienen war oder nicht.

Auf der nicht relevanten Seite (hier: links) erschien die graue Scheibe immer, auf der relevanten nicht immer. Abbildung 32a zeigt den Trialaufbau für einen linkshemisphärisch, Abbildung 32b einen für einen rechtshemisphärisch untersuchten Probanden. Die Darbietung

[59] Das Verhältnis 12:8 ist darin begründet, dass aufgrund einer weiteren Matching-Variablen (Retinahälfte) sich immer vier Vpn in Alter, Geschlecht und eben auch Blockabfolge entsprechen mussten, wodurch nur Vierer-Gruppen möglich waren.

der Maske erfolgte jedoch immer und beidseitig. Die Präsentationszeiten waren wie folgt: Der visuelle Stimulus (Target oder Blank) erschien 500 ms nach dem akustischen Hinweisreiz und verschwand nach ca. 12 ms wieder (ein Frame bei 85Hz Bildwiederholungsrate). Nach einem Interstimulusintervall (ISI) von 28 ms (weißer Bildschirm) wurde dann die Maske gezeigt, die für ca. 36ms (drei Frames) zu sehen war. Daraufhin sollte die Vp entscheiden, ob die graue Scheibe im entscheidenden Gesichtsfeld erschienen war oder nicht (2-AFC). Die Trials waren in jedem Block pseudo-randomisiert.

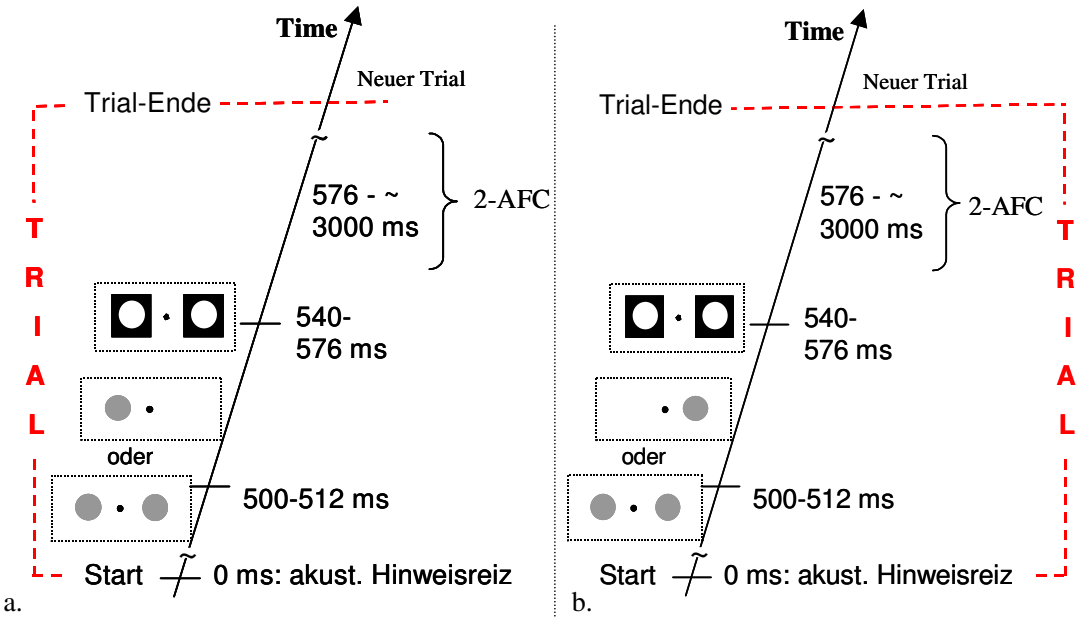


Abb. 32: a. *Trialaufbau für das Experiment der Probanden, deren Entdeckungsrate im rechten Gesichtsfeld untersucht wird;* **b.** *zeigt den Trialaufbau für die Untersuchung des linkes Gesichtsfeldes; in der jeweiligen nicht relevanten Gesichtsfeldhälfte erscheint die graue Scheibe immer.*

Abbildung 33 zeigt die Lokation und Größe der Stimuli: Die grauen Scheiben wurden peripher und in diesem Falle beidseitig auf weißem Hintergrund (77cd/m²) dargeboten. Sie besaßen einen Durchmesser von 5° Sehwinkel und eine Leuchtdichte von 19 cd/m². Die im weiteren Verlauf präsentierte Maske (nur in Abb. 31 zu sehen) erstreckte sich über 6° x 6° Sehwinkel und hatte eine Leuchtdichte von 0,5 cd/m². Der dem Fixationspunkt zugewandte Rand des Targets lag 5° Sehwinkel vom Fixationspunkt entfernt, was in etwa der Lokation der Patienten-Experimente entsprach.

6.1.4 B1: Versuchsdurchführung

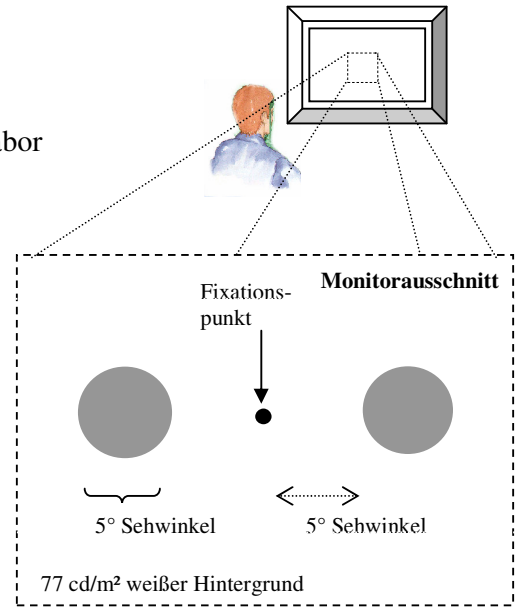


Abb. 33: *Lokation und Größe der grauen Scheibe (Target), deren Durchmesser 5° Sehwinkel betrug; Exzentrizität von Stimulusmitte zum Fixationspunkt: 7,5°.*

Nachdem sich die Vpn im iView-Labor eingefunden hatten, wurden zunächst zwei Fragebögen bearbeitet (siehe Anhang). Der erste Bogen fragte nach persönlichen Daten wie Initialen, Alter, Geschlecht etc. Daraufhin folgten Fragen zum aktuellen Allgemeinbefinden wie z.B. Müdigkeit und schließlich zum allgemeinen Gesundheitszustand: Neben psychiatrischen und neurologischen Erkrankungen wurden auch andere Störungsbilder wie Diabetis mellitus, Migräne oder Herzkrankheiten abgefragt, da sich diese Störungsbilder auch als Einflussfaktoren für Pupillengrößenveränderungen erwiesen hatten (siehe Punkt 3.4.3). Auf diese Weise konnte vorab ermittelt werden, ob die Pupillenreaktionen von Versuchspersonen möglicherweise konfundiert waren. Daraufhin erfolgte der Sehschärfe-Test mithilfe von Landoltringen, deren Öffnung in Form einer Uhrzeit angegeben werden sollte (standardisiertes Verfahren). Waren die Antworten der Fragebögen und das Sehschärfe-Ergebnis zufriedenstellend, erhielten die Vpn eine schriftliche Instruktion, die weitere Erklärungen zu dem Versuch (siehe Anhang) enthielt. Darin aufgeführt war die Information, dass die beiden zu diskriminierenden Stimuli (Target und Blank) ***im gleichen Verhältnis*** erscheinen würden: Tatsache war, dass *nur* der Übungsblock das gleiche Verhältnis von Blank- und Target-Trials (50:50) aufwies, nicht aber die Experimentalblöcke 1 und 2, die ja eben durch die unterschiedliche Target-Wahrscheinlichkeit definiert waren. Diese Aussage ist problematisch, da sie in einer Hinsicht irreführend, in anderer Hinsicht aber notwendig war. Sie war irreführend, weil die Vpn suggeriert bekamen, dass in *allen* Durchgängen ein gleiches Verhältnis vorliegt. Tatsache war aber – und dies ist die Berechtigung für diese Information -, dass die Trials in beiden Experimentalblöcken *gemeinsam* das gleiche Verhältnis hatten (siehe Tab. 18). Notwendig ist diese Information, damit die Vpn im Zweifel – und der sollte ja generiert werden - ihre Antworten ungefähr 50:50 verteilten. Wenn die Vpn die tatsächliche Information des jeweiligen Blockes vorab

erfahren hätten, wären vermutlich die Antwortkategorien (*Treffer*, *Falscher Alarm*, *Verpasser* und *Korrekte Zurückweisung)* nicht ausreichend besetzt gewesen.

Der Übungsblock war ferner so gestaltet, dass die Stimuli (Blank bzw. Target) für ca. 50 ms präsentiert wurden und dadurch wesentlich leichter zu erkennen waren als in den Experimental-Blöcken. Diese Übungsphase diente also nicht nur der Vertrautmachung der anstehenden experimentellen Aufgabe, sondern sollte den Vpn auch nahe bringen, im Zweifel ihre Antworten gleich zu verteilen.

Eine weitere Besonderheit stellte die Zuordnung der Hand dar, mit der die Probanden die Antworttasten betätigen sollten: Angestrebt wurde, dass eine linkshemisphärisch untersuchte Vp mit der rechten und eine rechtshemisphärische mit der linken Hand antworten sollte. Der Grund lag darin, dass die zugeordneten Hände primär von der Hemisphäre gesteuert werden sollten, deren Entdeckungsleistung untersucht wurde: Die visuelle Informationsverarbeitung und die motorische Planung bzw. deren Ausführung sollten in ein und derselben Hemisphäre erfolgen.[60]

Nachdem die Vpn die Instruktion gelesen und - dem Vernehmen nach - verstanden hatten, bearbeiteten sie zunächst das erwähnte Übungsskript. Zusätzlich erhielten die Probanden in der Übungsphase ein akustisches Feedback unmittelbar nach ihrer Antwort bzw. ihrem Tastendruck (250Hz-Ton für eine richtige und 1000 Hz-Ton für eine falsche Antwort). Dieses Feedback erfolgte aber nicht in der Experimentalphase (1. und 2. Block), um Irritationen seitens der Versuchsperson (z.B. Freude oder Ärger über den Erfolg bzw. Misserfolg) gering zu halten. Der Übungsblock bestand aus 60 Trials, je 30 Target- und Blank-Trials. Diese Daten wurden nicht ausgewertet.

Innerhalb eines Experimentalblockes (240 Trials) waren fünf Pausen von mindestens 30 Sekunden (nach jeweils 40 Trials) vorprogrammiert, in denen sich die Probanden ausruhen und die Augen schließen konnten. Nach diesen 30 Sekunden Pause hatten sie die Möglichkeit, über einen Tastendruck die nächsten 40 Trials zu starten.[61] Nach der Bearbeitung eines Blockes sollten die Vpn eine Einschätzung bezüglich der Entdeckungsleistung und Konzentrationsfähigkeit abgeben. Das Ziel dieser Datenerhebung war, die psychophysischen und pupillometrischen Daten mit dem subjektiven Erleben in Verbindung zu bringen und daraufhin zu überprüfen, ob das Empfinden der Vpn (bezüglich Entdeckung und Konzentration) dem der Verhaltens- und physiologischen Daten entspricht. Die Fragen lauteten: „Wie gut konnten Sie sich konzentrieren?“ und „Wie schätzen Sie Ihre Entdeckungsleistung ein?“ Zur Beantwortung stand der Vp eine Skala von 1 (sehr gut) bis 5

[60] Die genaue Vp-Instruktion ist im Anhang einzusehen.
[61] Pro 40 Trials waren 8 seltene und 32 häufige Stimuli (20:80).

(sehr schlecht) zur Verfügung. Um die Motivation bzw. Anstrengung zu erhöhen, wurde für den „Gewinner“ (Vp mit höchster Entdeckungsleistung) ein Preis im Wert von 10 Euro, dem 2. und 3. Platz je einer von 5 Euro in Aussicht gestellt.

Die Terminologie in der Zusammenfassung: Das Experiment bestand aus einem Übungsteil und zwei Experimental-Blöcken. Ein Experimentalblock enthielt 240 Trials; diese waren zu je 40 Trials gruppiert. Jeder Trial dauerte in etwa 3 Sekunden und beinhaltete die Präsentation eines Targets oder eines Leerreizes (Blank) mit anschließender Maske. Die Aufgabe der Vp lautete, unter strenger Fixierung des Mittelpunktes über einen Tastendruck anzuzeigen, ob das Target (graue Scheibe) oder der Leerreiz (Blank) im relevanten Gesichtsfeld präsentiert wurde. Die Reaktionszeit spielte keine Rolle, es wurde aber um spontane Reaktionen gebeten, um das Experiment nicht unnötig in die Länge zu ziehen.

Vor Beginn der Übungsphase wurden die Augenbewegungen kalibriert (siehe Punkt 4.3.2), um sicher zu sein, dass nicht foveal, sondern wirklich peripher stimuliert worden war. Die Beleuchtung im Untersuchungsraum betrug 0,5-1,5 cd/m². Alle Vpn wurden von zwei Versuchsleitern betreut: Die Leitung hatte der Autor dieser Schrift (C.L.), der im Zuge der praktischen Ausbildung von Studierenden der Heinrich-Heine-Universität (Diplomstudiengang Psychologie) mit je einem Psychologie-Studenten die Anweisungen und Durchführungen vornahm.

6.1.5 B1: Ergebnisse

Für die psychophysische Auswertung spielt die Wahrscheinlichkeit, mit der die Targets erschienen sind, eine untergeordnete Rolle, da die Entdeckungsleistung wieder über die *Treffer* – minus *Falsch-Alarm*-Rate definiert ist.[62] Zur besseren Übersicht der psychophysischen Entdeckungsleistung wurde die Entdeckungsleistung pro Block erhoben und im Anschluss über die Blöcke gemittelt. Abbildung 34 stellt in einem Säulendiagramm die Mittelwerte für jede Vp dar: Zu erkennen ist eine große Spannbreite in der Entdeckungsleistung, die über alle Vpn im Mittel 22%-Punkte ausmacht. Da diese Untersuchung die Korrespondenz von psychophysischen und pupillometrischen Daten

[62] Zwar weist die Signal-Entdeckungs-Theorie darauf hin, dass der Sensitivitätsindex d’ von dem Antwortkriterium bzw. der Antwortverteilung beeinflusst wird, sie spielt allerdings eine nur marginale Rolle, da die Vpn in der Regel zu je 50% ihre Antworten Target bzw. Blank verteilt haben. Da es sich ferner um eine ausbalanciertes Messwiederholungsdesign bezüglich der Target-Wahrscheinlichkeit handelt, sollten sich evt. auftretende Unterschiede herausmitteln.

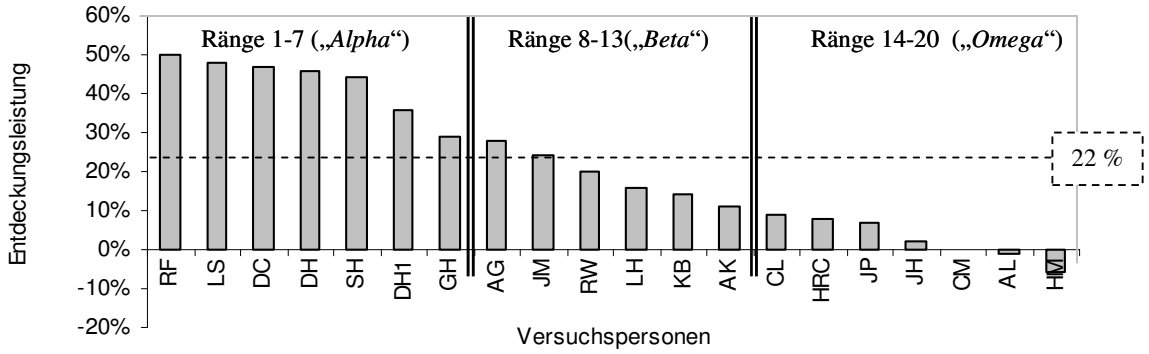


Abb. 34*: Die durchschnittliche Entdeckungsleistung bei 20 Vpn ergibt eine um 22%-Punkte bessere Treffer- als Falsch-Alarm-Rate, wobei die Spanne von 50 % bis -6 % zu verbuchen ist.*

angeht, sei schon jetzt auf die Zusammenstellung von drei Vpn-Gruppen hingewiesen: In Anlehnung an ethologische Terminologien wurden die psychophysisch „führenden“ Stichproben-Probanden als *Alpha*-Gruppe, die darauf folgenden als *Beta*-Gruppe und die übrigen als *Omega*-Gruppe bezeichnet. Im Mittel erreichte die *Alpha*-Gruppe eine Entdeckungsleistung von 43 % und unterschied sich in der Entdeckungsleistung erheblich von der der *Omega*-Gruppe, die im Mittel (nur) 5 % erreichte. Die *Beta*-Gruppe liegt mit 17%-Punkten dazwischen. Hierbei wird zu untersuchen sein, inwieweit sich pupillometrische Unterschiede zwischen den Gruppen ergeben.[63]

Kommen wir zu den psychophysischen Ergebnissen der rechts- bzw. linkshemisphärisch untersuchten Vpn. In Abbildung 35a ist zu sehen, dass Probanden, deren Aufgabe es war, im rechten Gesichtsfeld die grauen Scheiben ausfindig zumachen (Linke H.), im Mittel eine 20 %-ige und Probanden der zu vergleichenden Gruppe (Rechte H.) eine 23%-Punkte bessere *Hit*- als *Falsch-Alarm*-Rate erzielten. Die Streuung ist als Standardfehler vom Mittelwert angegeben (SE; standard error). Inferenzstatistische Analysen[64] ergaben im paarigen Vergleich (gematchte links- vs. rechtshemisphärische Vpn) einen z-Wert von z=-0,459, der einen P-Wert von p<.646 (Wilcoxon, 2-seitig) ausmacht und somit nicht signifikant war.

Die Analyse zur naso-temporalen Asymmetie (Abb. 35b) ergab, dass die nasal stimulierten Probanden im Mittel eine 20%-Punkte und die temporal stimulierten eine 23%-Punkte

[63] Bei dieser posthoc definierten Gruppenzuteilung wird lediglich ein Vergleich von Vpn mit „besseren“ und „schlechteren“ Entdeckungsleistungen vorgenommen. Dies impliziert jedoch nicht, dass z.B. die sieben Vpn der hier definierten Alpha-Gruppe auch außerhalb der Stichprobe, also in der Gesamtpopulation eine solche Stellung einnehmen würden. Ebenso verhält es sich mit den anderen beiden Gruppen. Die Untersuchung bezieht sich deswegen lediglich auf einen pupillometrischen Vergleich innerhalb der hier untersuchten Stichprobe.

[64] Aufgrund der relativ kleinen Stichprobe (n=10 Paare) wurden nicht-parametrische Verfahren angewendet.

höhere *Treffer*- als *Falsch-Alarm*-Rate erzielten. Der paarige Vergleich hier ergibt ebenfalls einen nicht-signifikanter P-Wert von p<.799 (Wilcoxon; 2-seitig; z = –0,255). Mit Blick auf die Abfolge der Blöcke – unabhängig von der Target-Auftretenswahrscheinlichkeit – ergaben sich deutliche Unterschiede: Abbildung 36 zeigt den individuellen Zuwachs der Entdeckungsleistung vom *ersten* zum *zweiten* Block. Für spätere Analysen wurden die Vpn der Höhe dieser Differenzen[65] nach in eine neue Rangfolge gebracht.

Zu erkennen in Abbildung 36 ist zunächst, dass bis auf drei Vpn (rechts außen) alle anderen sich verbessert haben. Im prä-post Vergleich (n=20) ergibt sich ein p-Wert von p<.001 (z = -3.445; Wilcoxon, 2-seitig), was insgesamt darauf hindeutet, dass die Vpn - *unabhängig* von ihrer absoluten Entdeckungsleistung - gelernt haben.[66]

Nichtsdestotrotz stellt sich die Frage, in wie weit Vpn mit einer höheren Zuwachsrate sich pupillometrisch von denen mit einer niedrigeren unterscheiden würden. Damit verbunden stellt sich außerdem die Frage, ob Vpn, die keinen oder nur geringen Zuwachs zeigten, dies auch pupillometrisch widerspiegeln. Deswegen werden alle Vpn analog zum bisherigen Vorgehen in drei neue Gruppen zusammengefasst, an deren Enden die sogenannten „Lerner“ auf der einen Seite und die sog. „Nicht-Lerner“ auf der

[65] Berechnungsgrundlage: Entdeckungsleistung des zweiten durchgeführten Blockes minus der des ersten Blockes; wenn beispielsweise im ersten Block 10% und im zweiten 20% erzielt wurden, beträgt die Differenz bzw. der in Abb. 30 dargestellte Zuwachs 10%.

[66] Auf die Leistungsverbesserung über die Zeit haben beispielsweise Breitmeyer & Ogmen (2000) hingewiesen.

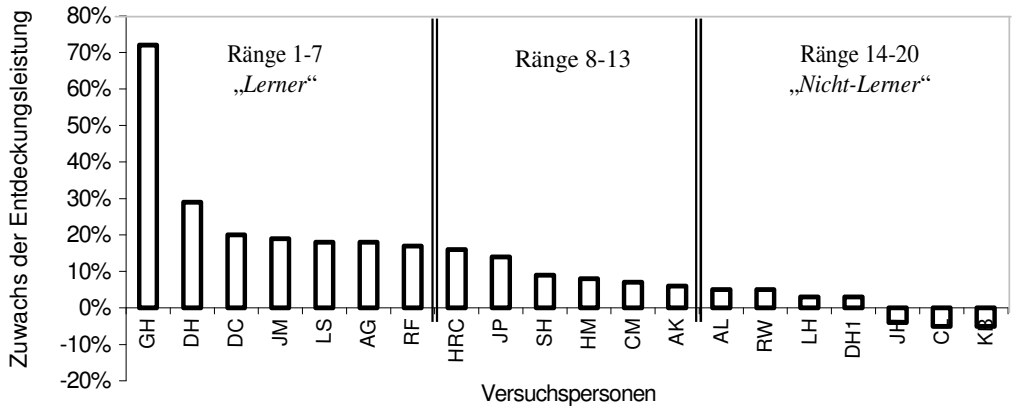


Abb. 36*: Zuwachs der Entdeckungsleistung vom ersten zum zweiten durchgeführten Experimentalblock, unabhängig von der Target-Wahrscheinlichkeit (siehe Text)*

Gruppe 0%-Punkte. Zu beachten ist hierbei, dass die zuvor definierten *Alpha*-Probanden zum anderen stehen[67]. Dies ist bereits in Abbildung 36 angedeutet: Der durchschnittliche Entdeckungszuwachs beträgt in der „Lerner“-Gruppe im Mittel 28%- , in der „Nicht-Lerner“- großen Teil die „Lerner“-Gruppe und die *Beta*- und *Omega*-Probanden zum großen Teil die „Nicht-Lerner“-Gruppe bilden. Nur eine Vp (DH1) zeigte *sowohl* im ersten *als auch* im zweiten durchgeführten Block eine für diese Stichprobe überdurchschnittliche Entdeckungsleistung.[68] Da der Sinn dieser Gruppenbildung jedoch darin besteht, intraindividuelle psychophysische Unterschiede auf pupillometrische Veränderungen hin zu untersuchen, bleibt diese Vp in der „Nicht-Lerner“-Gruppe. Tabelle 18 zeigt die Verteilung der *Alpha*-, *Beta*- und *Omega*-Probanden auf die zuletzt erstellten Gruppen.

Tab. 19: *Verteilung der bereits gruppierten Vpn auf die sog. „Lerner-„ und „Nicht-Lerner“-Gruppen*

Vpn	*Alpha*	*Beta*	*Omega*
"Lerner"	5	2	0
in between	1	1	4
"Nicht-Lerner"	1*	3	3

* (DH1)

[67] Zu beachten ist hierbei, dass bis auf drei Vpn *alle* einen „Lernerfolg“ erzielen konnten. Die Namensgebung zielt nur darauf ab, *innerhalb* der Stichprobe in eine stark lernfähige und eine weniger stark lernfähige Gruppe zu unterscheiden.

[68] Diese Vp sollte formal zu den „Lernern“ gezählt werden, da sie schon im ersten Durchgang 34% erzielen konnte. Wir könnten also annehmen, dass der Lernprozess besonders schnell stattgefunden hat (die im zweiten Block erzielte 37%-ge Rate wiese somit auf einen Deckeneffekt hin, so dass letzten Endes nur 3 % Zuwachs auftrat). Dennoch wird sie aus inhaltlichen Gründen nicht zu den „Lernern“ gezählt; siehe Haupttext.

6.1.6 B1: Pupillometrie

Im Zentrum dieses Experimentes steht die Frage, ob selten dargebotene Reize im SPE-Zeitfenster eine stärkere Pupillendilatation auslösen als häufig dargebotene.[69] Abbildung 37a gibt zunächst einen graphischen Überblick bezüglich des Verlaufs: Bei 0 ms beginnend

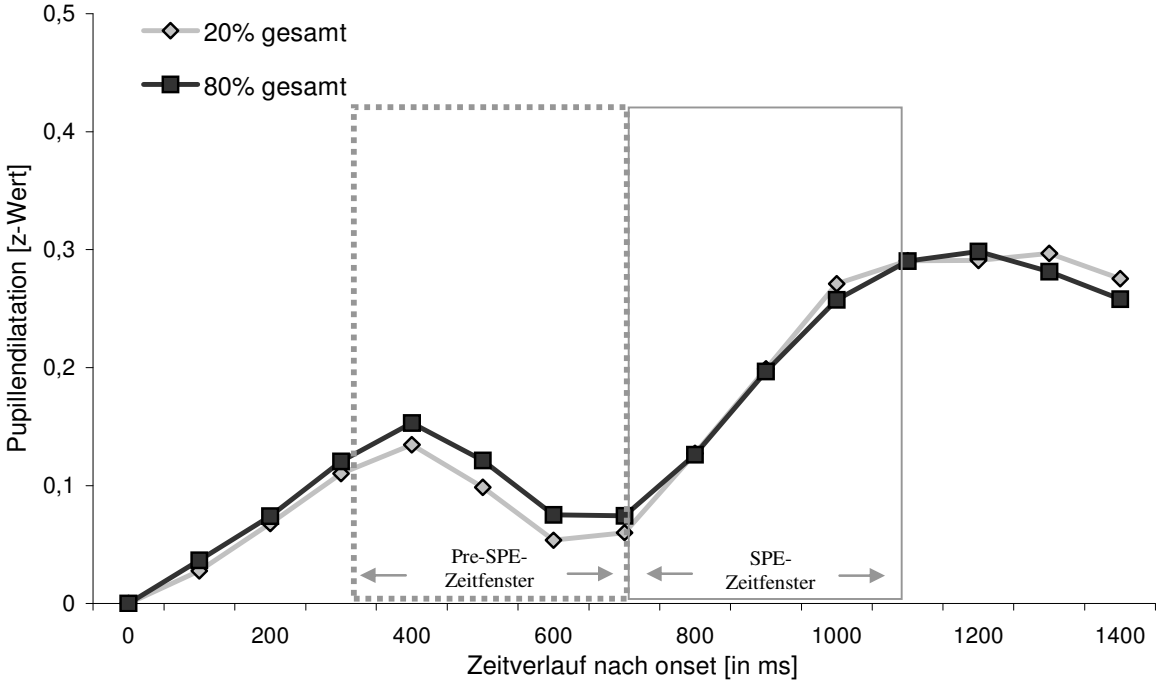


Abb. 37a. *Der über die Hemisphären gemittelte Zeitverlauf des Pupillendurchmessers in Abhängigkeit von der Stimulus-Wahrscheinlichkeit; angedeutet sind die zwei Zeitfenster Pre-SPE (gestrichelter Rahmen) und SPE (durchgezogener Rahmen).*

(stimulus onset) stellt sich in den nächsten 300 bis 400 ms eine relativ frühe Dilatation ein, wobei der 80%-Graph etwas höher ansteigt als der 20%-Graph. Diese frühe Reaktion der Pupille entspricht (vermutlich) der gut untersuchten Pupillenreaktion auf Licht- bzw. Dunkelreize (Pupillenlichtreflex; Kap. 3.4.1) und dürfte eine Reaktion auf die schwarze Maske sein, die im Anschluss an alle Stimuli erschien. Auf das SPE-Zeitfenster blickend erkennen wir – was die Baseline-Korrektur bei stimulus onset angeht – eine vergleichbare Amplitudenhöhe. Wie in den vorherigen

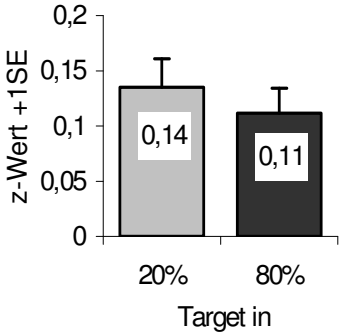


Abb. 37b*: Differenzen der gemittelten Amplitudenwerte in den o.g. Zeitfenstern; siehe Text*

[69] Selten dargebotene Reize sind „Targets" in der Target 20%-Bedingung gemittelt mit „Blanks" in der 80%-Bedingung. Dass diese Rechenoperation zulässig ist, zeigten die Ergebnisse der vorherigen Experimente.

Experimenten auch werden sich die nachfolgenden SPE-Berechnungen nicht auf den Zeitpunkt des Stimulus onset beziehen, sondern auf die Differenz zu dem Mittelwert des vorgeschalteten Zeitfenster, das in Abbildung 37a gestrichelt angedeutet ist und bereits einen Amplitudenunterschied von der 20%-igen zur 80%-iger Stimulusdarbietung vermuten lässt. In Abbildung 37b sind diese angedeuteten Unterschiede graphisch in Säulen umgesetzt: Wir erkennen, dass sich durch die Differenzberechnung von der gemittelten Amplitude des SPE-Zeitfensters zu dem vorgeschalteten Pre-SPE-Zeitfenster stärkere Dilatationen in der 20%-igen Stimulus-Bedingung (0,14 z-Einheiten) gegenüber der 80%-igen (0,11) ergeben haben. In der anschließenden Analyse dieser Differenzen (SPE minus Pre-SPE) brachte der intraindividuelle Vergleich von 20% vs. 80% einen z-Wert von z = 1,195, was bei einem P-Wert von p <.232 (Wilcoxon, n=20, 2-seitig) durchaus mit einem Zufallsbefund vereinbar ist.

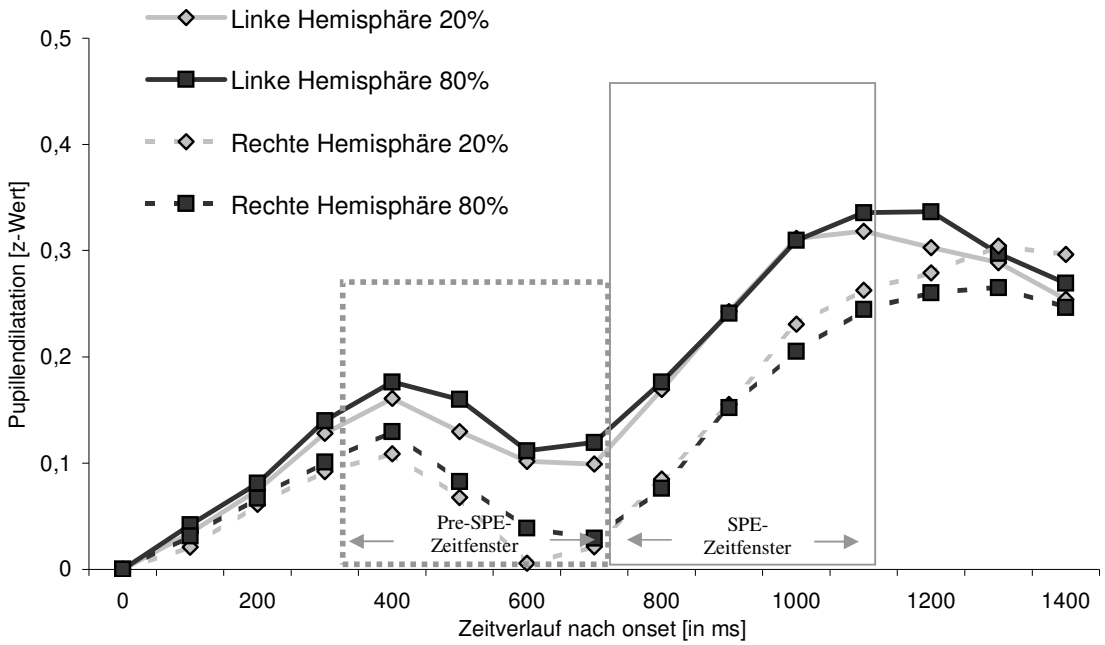


Abb. 38a. *Verlauf der Pupillendilatation in Abhängigkeit von der untersuchten Hemisphäre und der Target-Wahrscheinlichkeit; angedeutet sind die zwei Zeitfenster Pre-SPE (gestrichelter Rahmen) und SPE (durchgezogener Rahmen).*

In Abbildung 38a ist der Verlauf der Pupillenreaktion für die Hemisphären getrennt dargestellt. Auch hier erkennen wir eine Ähnlichkeit im Verlauf, die Amplitudenhöhe jedoch ist bei linkshemisphärisch untersuchten Probanden höher als bei rechtshemisphärischen. Abbildung 38b stellt dies für die genannten Zeitfenster im Balkendiagramm dar: Darin zeigt sich, dass sowohl im Pre-Spe-Zeitfenster als auch im SPE-Zeitfenster die über die beiden

Blöcke gemittelten Amplituden differieren, und zwar zugunsten der linken Hemisphäre. Die Inferenzstatistik zeigt jedoch keine signifikanten Ergebnisse (Wilcoxon, 2-seitig, n=10, z=1, 172; p <.241 für Pre-SPE; z = 1,784; p<.074 für SPE). Dennoch muss eine Tendenz festgehalten werden dergestalt, dass die linke Hemisphäre insgesamt stärker auf die visuelle Stimulation anspricht als die rechte.

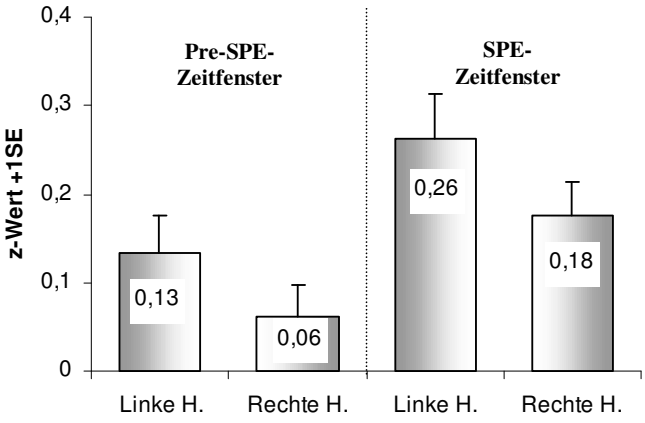


Abb. 38b*: Hemisphärenvergleich mit absoluten z-Werten über die 20-und 80%-Stimulus-Bedingung gemittelt im Pre-SPE und SPE-Zeitfenster*

Auch die naso-temporalen Pupillendaten (Abb. 39) lassen nur einen geringen unterschiedlichen Effekt erkennen: Während nasal untersuchte Vpn auf ein Target – sowohl in der Target-20%- als auch in der Target-80%-Bedingung – mit 0,13 z-Wert-Einheiten Pupillenzuwachs reagierten, zeigten die Probanden der temporalen Gruppe zumindest einen *tendenziellen* SPE, da auf selten dargebotene Targets (Target-20%) mit 0,04 z-Wert-Einheiten (0,13-0,09) mit mehr Zuwachs reagiert wurde als auf häufig dargebotene (Target-80%).

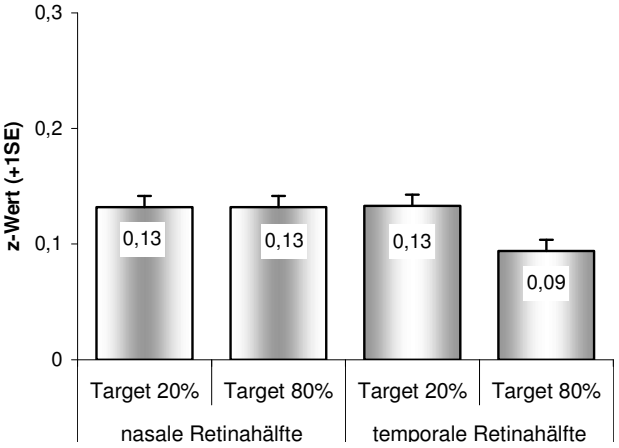


Abb. 39. *SPE in Abhängigkeit von der stimulierten Retinahälfte (nasal vs. temporal) und Target-Wahrscheinlichkeit (20 vs. 80%); s.Text.*

6.1.7 B1: Korrespondenz zwischen Psychophysik und Pupillometrie

Das Ziel dieses Unterpunktes ist die Beantwortung der Frage, inwiefern der SPE von der Bewusstheit visueller Stimuli abhängt. Der Grad dieser visuellen Bewusstheit kann allerdings nur aus den 2-AFC-Ergebnissen und aus den Rating-Daten geschätzt werden[70]. Als Schätzung haben wir die Entdeckungsleistung der Targets herangezogen, und aufgrund dieser haben wir drei Gruppen von Vpn definiert, die sog. *Alpha*-, *Beta*- und *Omega*-Probanden. Erstgenannten gelang die Entdeckung der Stimuli deutlich besser (Mittelwert: 43%) als letztgenannten (5%). Wie nun unterschieden sich die beiden am weitesten auseinander liegenden Vpn-Gruppen pupillometrisch? Abbildung 40 zeigt die Dilatations-Zunahme für *Alpha*- und *Omega*-Probanden: Darin ist erkennbar, dass die psychophysisch erfolgreicheren *Alpha*-Probanden einen stärkeren SPE aufweisen (0,06) als die *Omega*-Probanden (-0,01); mittels Wilcoxon-Test kann jedoch innerhalb der Gruppen (n=7 paarige prä-post-Vergleiche) kein signifikantes Ergebnis erzielt werden. Gleichwohl liegt bei *Alpha*-Probanden mit einem p-Wert von p<.063 (2-seitig, z=1,859) ein Trend vor, der bei *Omega*-Probanden in geringerem Ausmaß vorliegt (p<.169, 2-seitig, z=0,866).

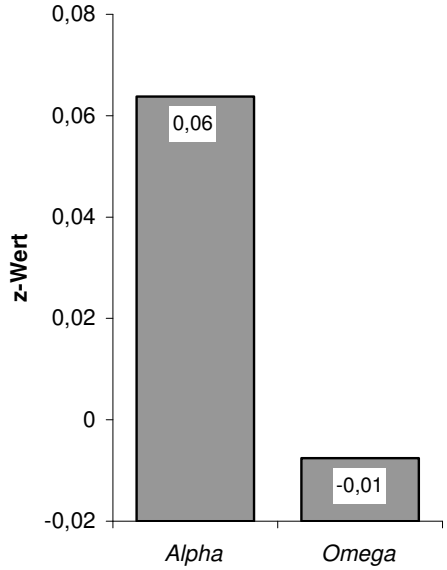


Abb. 40*: SPE-Vergleich von Alpha- zu Omega-Probanden, siehe Text.*

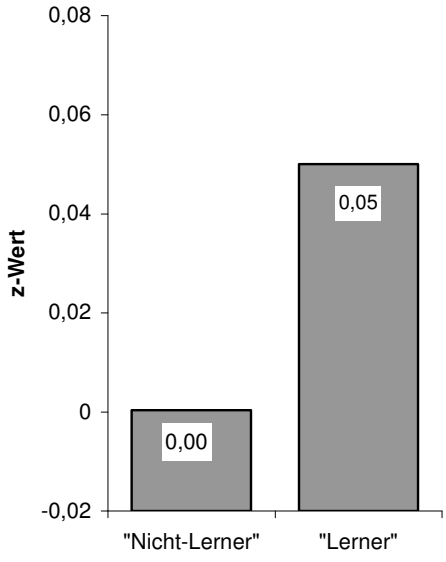


Abb. 41*: SPE-Zunahme vom ersten zum zweiten Block bei sog. „Nicht-Lernern" und „Lernern"; siehe Text.*

[70] Inwiefern das 2-AFC Ergebnis bzw. die Rating-Daten als Schätzung valide sind, wird in der Allgemeinen Diskussion erörtert.

Im vorausgegangenen Ergebnisteil hatten wir u.a. festgestellt, dass *innerhalb* einer Vp der zweite Block signifikant erfolgreicher bearbeitet wurde als der erste Block, unabhängig von der Target-Wahrscheinlichkeit. Es bietet sich daher an, die Pupillenreaktionen vom zuerst bearbeiteten Experimentalblock mit dem darauffolgenden zu vergleichen. Wenn die visuelle Bewusstheit ein wichtiger Einflussfaktor für den SPE sein soll und diese in den Ergebnissen der Psychophysik zum Ausdruck kommt (was noch zu diskutieren sein wird), müsste letzterer im zweiten Block stärker ausfallen. Abbildung 41 zeigt, dass die „Nicht-Lerner" im SPE keinen Zuwachs verbuchen konnten (0,00), währenddessen die „Lerner" mit 0,05 z-Wert Einheiten zulegten. Inferenzstatistisch jedoch kann auch diese Differenz nicht vom Zufall abgegrenzt werden; die entsprechenden Werte lauten bei „Nicht-Lernern" $p < .866$ (2-seitig, Wilcoxon, n=7; z=-,169) und bei „Lernern" $p < .128$ (2-seitig; Wilcoxon, n=7, z=1,521).

Wie gut konnten sich die Vpn konzentrieren und wie schätzten sie ihre Entdeckungsleistung ein? Abbildung 42 zeigt das Ergebnis für die Angabe zur Konzentration in Abhängigkeit von der tatsächlichen Entdeckungsleitung (*Treffer*-minus *Falsch-Alarm*-Rate) für die beiden Blöcke getrennt: Wie zu erkennen ist, hat keine Vp die Konzentration mit *sehr gut* oder *sehr schlecht* angegeben; die meisten Probanden wählten die 2 (=gut) oder 3 (=mittelmäßig). Dass diese Angaben in keinem signifikanten Zusammenhang mit den tatsächlichen Entdeckungsleistungen stehen, geht aus Tabelle 19 hervor, in der die Korrelationskoeffizienten und deren p-Werte aufgelistet sind.

Tab. 20*: Korrelationen von Konzentration und Leistungseinschätzung mit tatsächlicher Entdeckungsleistung*

	Korrelation* mit **Konzentration**	p-Wert 2-seitig	Korrelation* mit geglaubter **Entd.-Leist.**	p-Wert 2-seitig
Entdeckungsleistung 20%	-0,205	0,385	-0,201	0,397
Entdeckungsleistung 80%	-0,245	0,298	-0,203	0,390

* Korrelation nach Spearman

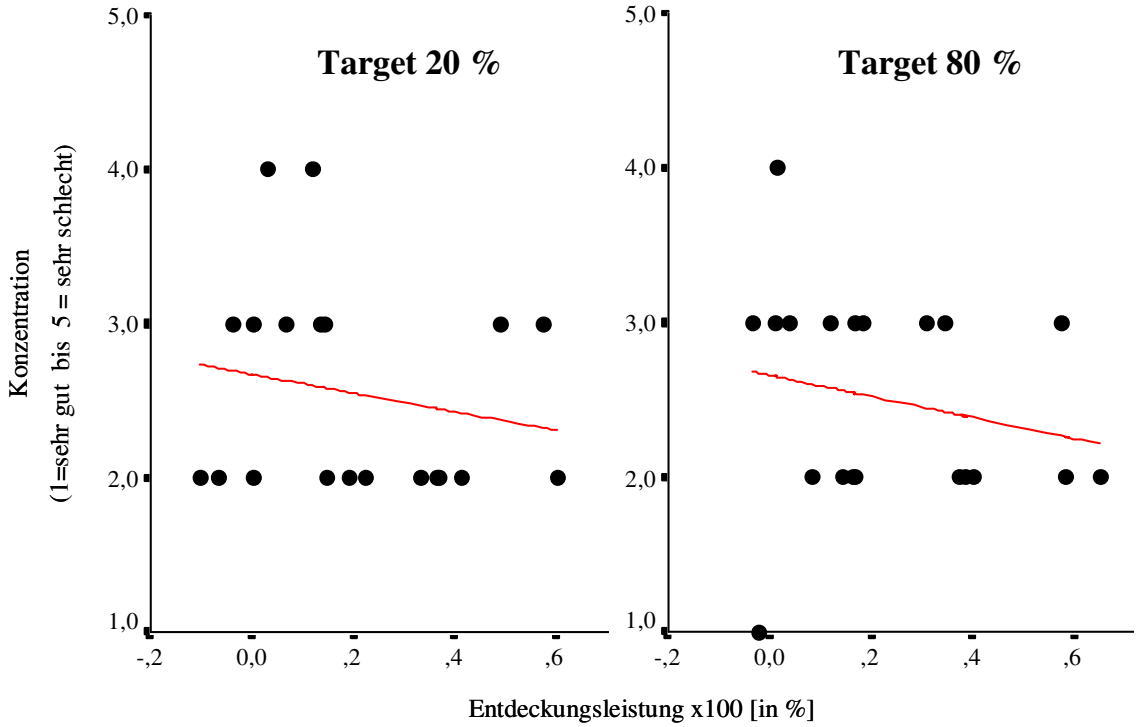


Abb.42: *Konzentration und psychophysische Entdeckungsleistung zeigen einen nur geringen negativen Zusammenhang zur Entdeckungsleistung, (pro Vp eine Einschätzung)*

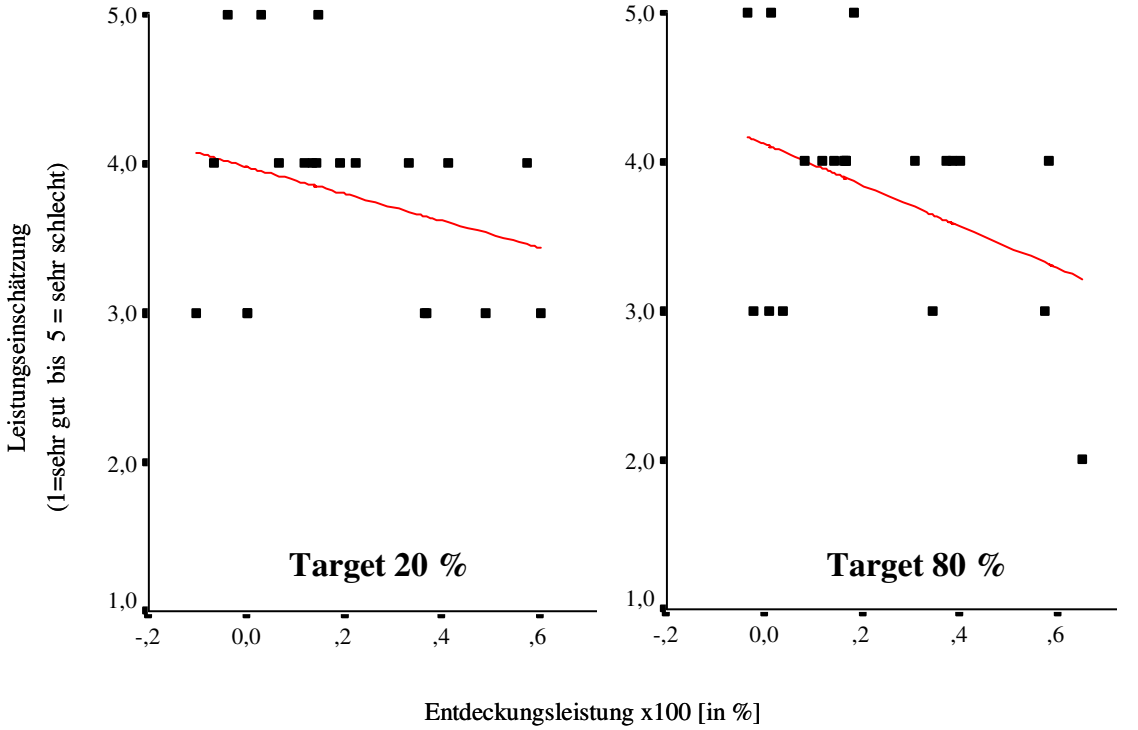


Abb.43: *Leistungseinschätzung und psychophysische Entdeckungsleistung zeigen einen ebenfalls nur geringen negativen Zusammenhang, (pro Vp eine Einschätzung)*

Abbildung 43 zeigt die Einschätzung der Vpn, bezüglich ihrer Entdeckungsleistung. Von 2x20 Einschätzungen hat nur einmal eine Vp eine „2“ (=gut) vergeben (diese Vp hat auch tatsächlich eine um 60%-Punkte bessere *Treffer*- als *Falsch-Alarm*-Rate erzielen können; dargestellt rechts unten bei Target 80%). Ansonsten finden wir nur Leistungseinschätzungen zwischen „3“ und „5“ vor, was die Schwierigkeit der Aufgabe widerspiegelt. Zusätzlich sind die Regressionsgeraden eingezeichnet, die einen schwachen negativen Zusammenhang vermuten lassen.[71] Insgesamt gesehen gaben die Vpn eine Konzentrationsfähigkeit von „2,5“ und Entdeckungsleistung von „3,8“ an.

Kommen wir zuletzt zur Selbsteinschätzung der *Alpha*- und *Omega*-Probanden: Abbildung 44 zeigt in einem Boxplotdiagramm auf linken Seite die Konzentrations-, auf der rechten Seite die subjektiven Leistungsangaben: Es wird deutlich, dass *Omega*-Probanden eine etwas größere Streuung – sowohl bei der Konzentration, als auch in der Leistung – aufweisen. Andererseits unterscheiden sich die Mediane (schwarze Balken) nur wenig voneinander: *Alpha*-Probanden geben mit 2,5 eine geringfügig bessere Konzentration als *Omega*-Probanden (3,0) an. In der Leistungseinschätzung liegen beide Gruppen bei 3,5. Somit liegt kein Hinweis auf eine Abhängigkeit der psychophysischen Leistung (2-AFC) von der Bewusstheit (Selbsteinschätzung der Leistung) vor.

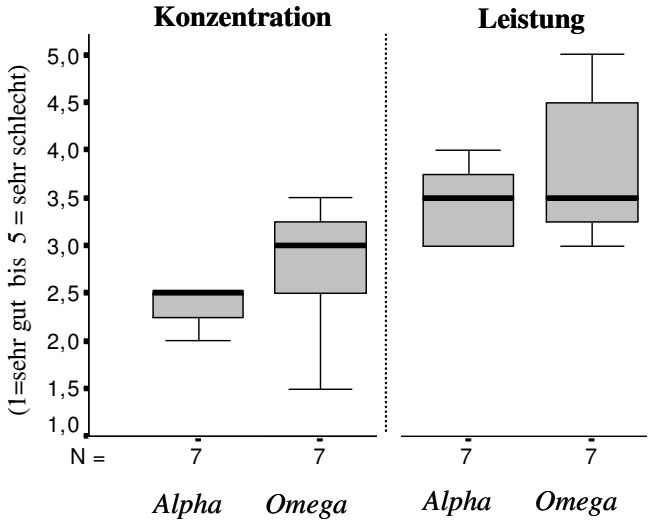


Abb. 44: *Selbsteinschätzung der Alpha- und Omega-Probanden hinsichtlich ihrer Konzentration während des Experimentes und der Einschätzung ihrer Entdeckungsleistung (Median: schwarzer Balken; Interquartil-Bereich: Graue Fläche; Spannweite: Streuungsbalken.*

6.1.8 B1: Diskussion

Die *psychophysische* Entdeckungsleistung variierte erheblich und reichte von –6 %- (HM) bis zu 50%-Punkten (RF). Die Schwierigkeit der Target-Entdeckung wird auch bei der Selbsteinschätzung deutlich und zeigt, dass erfolgreiche und weniger erfolgreiche Probanden ihre Leistung ähnlich niedrig einstuften. Im Mittel erzielten Probanden, die im linken

[71] Auf die Darstellung der Regressionsparameter wurde verzichtet; es lag keine Signifikanz vor.

Gesichtsfeld untersucht wurden, keine signifikant anderen Entdeckungsraten als die Probanden, die im rechten Gesichtsfeld untersucht wurden, so dass - psychophysisch– keine Evidenz für einen Hemisphärenunterschied vorliegt.

Zu den pupillometrischen Ergebnissen kann zunächst gesagt werden, dass tendenziell ein SPE ermittelt werden konnte, der allerdings nicht das Signifikanzniveau erreichte. Die SPE-Untersuchung bezüglich der Hemisphären war weitgehend unauffällig, es zeigte sich jedoch eine - von der Wahrscheinlichkeit der Stimuli unabhängige -größere Dilatation bei linkshemisphärisch untersuchten Probanden. Mit Blick auf die Korrespondenzen hat sich ergeben, dass *Alpha*-Probanden in der Tat einen größeren SPE aufweisen als *Omega*-Probanden (beide Gruppenergebnisse blieben jedoch nicht signifikant), und im Weiteren die sog. „Lerner" einen größeren SPE als die „Nicht-Lernern" aufwiesen (auch nicht signifikant). Die Unterscheidung von nasal vs. temporal stimulierten Probanden spielte psychophysisch (2-AFC) und pupillometrisch (SPE) keine (signifikante) Rolle.

Summa summarum weisen die Ergebnisse zwar eine SPE-Tendenz auf, es konnte jedoch kein überzeugender Beleg dafür erbracht werden, dass der SPE auch bei schwellennaher Stimulation auftritt. Wenn wir den Blick ausschließlich auf die Ergebnisse der *Omega*-Probanden lenken, sprechen die Ergebnisse eher für die Nullhypothese, die ja besagte, dass der SPE von der visuellen Bewusstheit abhängt. Dass die sog. „Lerner" bessere SPE-Ergebnisse erbringen würden als die „Nicht-Lerner" war insofern zu erwarten, als dass die *Alpha*-Probanden bereits einen tendenziellen SPE zeigten und diese den Großteil (5 von 7) der „Lerner"-Gruppe ausmachte.

Worauf könnte nun die ausgebliebene Signifikanz - auch die *Alpha*-Probanden zeigten ja keinen *signifikanten* SPE - zurückzuführen sein? Ein Erklärungsansatz liegt in der Darbietung der Maske, die zu einer erheblichen kurzzeitigen Abnahme der Bildschirmleuchtdichte führte. Der Effekt dieser Verdunkelung zeigt sich in der frühen Pupillendilatation, die ihren ersten Gipfel bereits bei ca. 400 ms post onset erreichte, dann abfiel, um erneut - nach ca. 700 ms - wieder anzusteigen: Es wäre darum möglich, dass die (vermutlich) luminanzgesteuerte *frühe* Dilatation die wahrscheinlichkeitsgesteuerte *späte* Dilatation in ihrer Höhe beeinflusst bzw. deren relativ schwachen Mechanismus überlagert hat.[72] Ferner besteht potenziell die Möglichkeit, dass die Aufmerksamkeit bzw. Konzentration, mit der die Entdeckungsaufgabe bearbeitet wurde, zu gering war. Um diesen Einflussfaktor gering zu halten, wurde darauf geachtet, dass die Probanden nach je 40 Trials (~3 Minuten) eine Pause von mindestens 30 Sekunden einhalten mussten, so dass ausreichend

[72] Zum „schwachen Mechanismus" vergleiche Kap. 3.5.4.

Gelegenheit bestand, sich auszuruhen. Darüber hinaus zeigten die Angaben zur Selbsteinschätzung keine Hinweise darauf, dass es an Konzentration für die Aufgabe gemangelt hat. Die i.d.R. eher geringe Leistungseinschätzung *in Kombination* mit einer guten oder befriedigenden Konzentrationsangabe unterstreicht dabei eher den Schwierigkeitsgrad der Aufgabe als eine mangelnde Motivation.[73]

Warum die linke Hemisphäre stärker auf diese Reizanordnung ansprach als die rechte, ist eine offene Frage: Es bietet sich als Erklärung zunächst an, an die Tastenbedienung zu denken: Linkshemisphärisch untersuchte Probanden bedienten die Antworttasten mit der rechten Hand, rechtshemisphärisch untersuchte mit der linken Hand. Hier könnte das Ergebnis der bereits genannten Studie von RICHER und BEATTY (1985), dass motorische Planung und Betätigung von Antworttasten („Go"-Bedingung) eine stärkere Dilatation mit sich bringen als Antworten, die keiner motorischen Reaktion bedurften („No-Go"-Bedingung) eine Erklärung bieten: Es wäre denkbar, dass die rechtshemisphärisch untersuchten Probanden, die ja alle mit ihrer nicht-dominanten Hand antworteten, aufwendigere Netzwerke für motorische Planung und Ausführung beanspruchten als die Pendant-Gruppe, die mit ihrer dominanten Hand antworteten. Dann wäre allerdings ein gegenteiliger Befund zu erwarten gewesen, da eine eingeübte Handbewegung weniger „neuronale Aktivität" nach sich zöge als eine weniger eingeübte. Die Daten zeigen jedoch bei Betätigung der dominanten Hand größere Pupillendurchmesser, so dass die Händigkeit bzw. die motorische Reaktion per se vermutlich keinen großen Einfluss hatte. Mit Blick auf die Strategien der Hemisphären konnte vorab keine stringent begründete Richtung des erwarteten Effektes formuliert werden: A posteriori könnte jedoch die zeitliche Auflösung, mit der Hemisphären arbeiten, einen Beitrag zur Erklärung liefern: Möglicherweise kam der linken Hemisphäre bei der schnellen Reizabfolge (Target, dann Maske) die erhöhte zeitliche Auflösungsfähigkeit dergestalt zugute, dass sie – jenseits der psychophysischen Entdeckungsleistung, die ja für beide Hemisphären nicht signifikant verschieden waren – pupillometrisch eine von der Target-Wahrscheinlichkeit unbeeinflusste stärkere Reaktion begünstigte. Diese These würde jedoch implizieren, dass die linke Hemisphäre mehr „Aufwand" bei der Aufgabenbewältigung betreibe, ohne jedoch den SPE (über die Auftretenswahrscheinlichkeit) oder die perzeptive Ebene (über die Entdeckungsleistung) positiv bzw. zum Vorteil gegenüber der rechten Hemisphäre zu beeinflussen. Die psychophysischen Daten allein betrachtend liegt die Entdeckungsleistung der rechtshemisphärisch untersuchten Probanden sogar tendenziell höher: Dieser Befund spricht eher dafür, dass die letztgenannte Hemisphäre mit weniger (neuronalen) „Aufwand"

[73] Da in diesem Experiment den erfolgreichsten drei Vpn ein kleiner Preis in Aussicht gestellt wurde, erschien die Motivation vom persönlichen Eindruck her hoch.

ein besseres Endergebnis erzielte. Warum allerdings die rechte Hemisphäre diesen tendenziellen Vorteil zu haben scheint, bleibt offen. Möglicherweise bieten aber auch Aufmerksamkeits-Modelle, die zur Erklärung des neuropsychologischen Phänomens des Neglekt-Syndroms[74] formuliert wurden, eine Erklärung: Der Kern dieser Modelle besteht darin, dass Mechanismen der Aufmerksamkeit asymmetrisch - zugunsten der rechten Hemisphäre – lateralisiert seien. MARCEL KINSBOURNE vermutet, dass jede Hemisphäre ein kontralaterales Aufmerksamkeits-Feld besitzt und außerdem die gegenüberliegende Hemisphäre hemmen kann. Er schreibt der linken Hemisphäre einen stärkeren Einfluss auf die rechte zu als andersherum, so dass nach rechtshemisphärischen Läsionen das normale Übergewicht der linken Hemisphäre so stark werde, dass das linke Gesichtsfeld nur noch wenig bzw. keine Aufmerksamkeit mehr erhalte (Kinsbourne, 1993). Nach KENNETH HEILMAN et al. besitzt die rechte Hemisphäre die Fähigkeit, beide Gesichtsfeldhälften mit Aufmerksamkeit zu versehen, die linke Hemisphäre aber nur dem rechten Gesichtsfeld. Bei Ausfall oder Funktions-Einschränkung der rechten Hemisphäre resultiere daraus eine Vernachlässigung des linkes Gesichtsfeldes bzw. der linken Körperhälfte (Heilman et al, 1993). Beide Modelle sehen ein stärkeres bzw. doppeltes Aufmerksamkeits-„Netzwerk“ für das rechte Gesichtsfeld vor, was der Grund sei, dass das Neglekt-Phänomen in erster Linie die linke Seite betrifft (Springer & Deutsch, 1998, S.173ff). In diesem Experiment könnte eine solche funktionale Asymmetrie die stärkere Pupillendilatation insofern erklären, als dass die relevanten Stimuli der rechten Gesichtsfeldhälfte von *beiden* Hemisphären bedacht wurden und somit zu einer erhöhten Aufmerksamkeit führten, während Stimuli im linken Gesichtsfeld tendenziell eher nur von Aufmerksamkeits-Netzwerken *einer* Hemisphäre verarbeitet wurden. Warum allerdings eine solchermaßen „erhöhte Aufmerksamkeit“ – wie auch immer sie definiert sein mag - nur unspezifische Resultate erbringt und nicht wie von CARRASCO und Kollegen (2004) postuliert, die Sensitivität für Reize verbessert bzw. wie von BÜCHEL et al. (1998) beschrieben subkortikale Strukturen vermehrt involviert und über diesen Weg zu einem SPE führt, bleibt offen. Abschließend betrachtet lassen sich die Ergebnisse am ehesten mit der These vereinbaren, dass die Pupillenantworten weitestgehend mit den psychophysischen Entdeckungsleistungen korrespondieren. Inwiefern letztere ein valides Maß für die Messung der visuellen Bewusstheit ist, wird in der Abschlussdiskussion erörtert.

[74] Das Neglektsyndrom bezeichnet eine halbseitige Vernachlässigung, die z.T. nach Unfällen oder Schlaganfällen beobachtet wird und mit ausgedehnten Schäden in parietalen oder parietookzipitalen Regionen der typischerweise rechten Hemisphäre einhergehen. Die Patienten verhalten sich so, als ob der linksseitig gelegene Raum und z.T. auch die linke Körperhälfte nicht existiere. Ein Neglekt hingegen im rechten Gesichtsfeld bzw. der rechten Körperhälfte ist sehr selten, auch nach Schäden in entsprechenden Regionen der linken Hemisphäre. Diese Beobachtung führte zu Aufmerksamkeits-Modellen wie die von HEILMAN und KINSBOURNE; siehe Text.

6.2 B2: Experiment „Happy vs. Sad"

Im letzten Experiment namens "Happy vs. Sad" wird der SPE mit Stimuli untersucht, die sich – was die Leuchtdichte angeht - nicht unterschieden. Obwohl in bisherigen Experimenten die physikalischen Reizeigenschaften keinen messbaren Einfluss ausübten, bedeuteten Target und Blank-Reize immer auch eine Leuchtdichteveränderung, die möglicherweise einen – wenn auch geringen - Einfluss auf frühe Pupillendilatationen gehabt haben können.[75] In diesem Experiment wurden deswegen normalsichtigen Probanden sog. Smileys dargeboten, die sich lediglich in der Form ihres Mundwinkels (Abb.45***a*** entspricht *happy* oder ***b*** *sad*), nicht aber in der Luminanz unterschieden. Die Frage war, inwieweit der SPE unabhängig von Luminanzänderungen in Erscheinung tritt. QIYUAN et al. (1985) haben dies auf Basis von akustischen Reizen zeigen können, die auf visueller Ebene – weil sie eben akustischer und nicht optischer Natur waren – keinen Einfluss hatten. Blindsehforscher haben – um Informationsverarbeitung in blinden Gesichtsfeldanteilen zu erfassen (siehe Einleitung) – natürlich mit visuellen Stimuli experimentiert, aber in diesen Studien wiesen die Reize entweder eine verschiedene Leuchtdichte auf oder sie wurden – wenn sie tatsächlich isoluminant waren - ausschließlich im Hinblick auf die *frühen* Pupillenreaktionen untersucht (vgl. Barbur, 2004). In Fortsetzung zu den bisherigen Experimenten war zu klären, inwiefern der SPE von einer bewussten bzw. schwellennahen Reizpräsentation abhängig ist. Dazu mussten die Vpn in der ersten Hälfte des Experiments o.g. Smileys diskriminieren: entweder erschien *happy* oder *sad* mit der Besonderheit, dass dem jeweiligen Reiz eine sog. Maske (Abb.45***c***) folgte. Die Maske stellt eine Mischung der beiden möglichen Smileys dar und macht eine Entscheidung, ob *happy* oder *sad* dargeboten worden ist, sehr schwierig. Folglich war der Proband in der Regel unsicher. Da es sich aber auch hier um ein 2-AFC-Verfahren handelte, musste sich die Vp entscheiden, welcher der beiden Stimuli dargeboten worden war. Wie in den vorausgegangen Experimenten wurden *happy* und *sad* in unterschiedlichem Verhältnis präsentiert: Zur Vergleichbarkeit mit QIYUANs Studie und in Fortsetzung zu den bisherigen Experimenten wurden die Verhältnisse 20:80, 50:50 sowie 80:20 für die Stimuli *happy* und *sad* gewählt. Die erste Experimentalhälfte (1.Block)

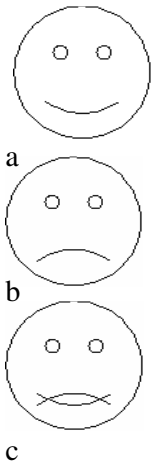


Abb. 45*: Smileys als Stimulusmaterial:* ***a.*** *happy,* ***b.*** *sad und* ***c.*** *Maske*

[75] Aus diesem Grunde wurde als Referenz immer die gemittelte Amplitudenhöhe des *Pre*-SPE-Fensters (anstelle der Baseline) gewählt.

entspricht wegen der zusätzlichen Darbietung der Maske einer *unterschwelligen* bzw. *schwellennahen* Präsentation. In der zweiten Hälfte des Experimentes (2. Block) folgt *keine* Maske auf die zu diskriminierenden Smileys, so dass die Unterscheidung („happy“ oder „sad“?) in der Regel keine Probleme bereitete. Für diesen zweiten Teil des Experimentes sollte nach QIYUAN et al. (1985) ein SPE vorzufinden sein. Wie aber verhält sich der SPE im ersten Experimental-Teil? HAKAREM und SUTTON (1966) zufolge sollte auch hier ein SPE zu finden sein, allerdings nur unter der Bedingung, dass die jeweilige Vp die beiden Stimuli mehr oder weniger gut diskriminieren kann. Bei Vpn hingegen, die sich psychophysisch auf Rateniveau befinden, sollte der SPE (nullhypothetisch) ausbleiben. Die bisherigen eigenen Befunde (Experimente A1, A2, B1) zeichneten hierzu kein einheitliches Bild, weswegen diese Nullhypothese beibehalten wurde.

Eine zusätzliche Frage mit Blick auf die Stimulusauswahl (i.e. Smileys) ist die, ob die hier gewählten Reize eine unterschiedliche Valenz (*happy* ~ positiv vs. *sad* ~ negativ) beinhalten und somit möglicherweise einen Effekt auf die psychophysische (2-AFC) oder pupillometrische (SPE) Entdeckungsleistung haben könnten.[76] Aus diesem Grunde wurden die Daten aus den Trials, die durch die beiden Stimuli definiert waren, gesammelt und als getrennter Faktor in einer ANOVA analysiert.

6.2.1 B2: Hypothesen

Stimuli, die nur in 20 % der Fälle dargeboten werden, erzeugen eine stärkere Pupillendilatation (SPE) als dieselben Stimuli mit 80%-iger Darbietung, wobei die Pupillenerweiterung einer 50%-igen – also gleichwahrscheinlichen - Stimulation dazwischen liegt. Nullhypothetisch gilt, dass bei zufälliger psychophysischer Entdeckungsleistung kein SPE auftritt. Alternativ wird hier untersucht, ob auch bei Vpn, die psychophysisch nicht überzufällige Ergebnisse zeigen, ein SPE vorzufinden ist (Alternativhypothese).

Darüber hinaus wird zu testen sein, ob die Smileys per se („Valenz“) einen Effekt auf die psychophysische und pupillometrische Entdeckungsleistung haben (ungerichtete Hypothese).

[76] Auf diese Frage eine Antwort zu finden ist problematisch, denn die Untersuchung eines SPE bedarf eines schiefen Verhältnisses, wodurch zwangsläufig eine Stimulusgruppe häufig und die andere selten dargeboten wird. Die Items, die eine Stimulusgruppe bildeten, dürften sich aber nicht (zu sehr) unterscheiden, da sonst möglicherweise andere (physikalische) Aspekte wie z.B. Ortsfrequenz die Daten konfundierten (zur methodischen Kritik der Studien von Hess, siehe Janisse, 1977). Sie sollten im Idealfall dieselben sein, was jedoch das Problem mit sich bringt, dass eine wiederholte Darbietung von identischen emotionalen Stimuli zu einer Abnahme des Effektes führen würde. Die Untersuchung der „Valenz-Frage“ wurde hier nicht systematisch durchgeführt, weil sie den Rahmen dieser Arbeit gesprengt hätte.

6.2.2 B2: Stichprobe und Untersuchungszeitraum

Es handelte sich bei den 18 Probanden (13 ♀, 5 ♂) überwiegend um Studierende im Alter von 20 bis 40 Jahren (Mittelwert: 24,4). Alle Versuchspersonen[77] durchliefen die beiden Teil-Experimente freiwillig und ohne finanzielle Anreize; sie waren nach eigenen Angaben frei von psychiatrischen und neurologischen Erkrankungen. Eventuell bestehende Sehschärfendefizite wurden mit Brille oder Kontaktlinsen ausgeglichen, wobei die Sehschärfe bei mindestens 1.0 lag.[78] Das Experiment dauerte insgesamt ca. 60 Minuten, wovon ca. 15 Minuten für die Erhebung von Fragebogen-Daten verwendet wurden.

Der Untersuchungszeitraum beschränkte sich auf den Monat April des Jahres 2003, in der Zeit von 9 bis max. 18 Uhr, nur wochentags.

6.2.3 B2:Versuchsdesign und Trialaufbau

Es handelt sich um ein 3-faktorielles Design mit den Faktoren *Experimenttyp* (Diskrimination vs. Reaktionszeit), *Stimulusvalenz* (*happy* vs. *sad*) sowie die Auftretenswahrscheinlichkeit (20%; 50% und 80%). Somit ergibt sich ein 2x2x3-Plan mit Messwiederholung auf allen drei Faktoren. Jede Versuchsperson bearbeitete in jedem Block je drei Skripte. Da jedes Skript 80 Trials enthielt, wurden insgesamt 480 Trials pro Vp bearbeitet und ausgewertet. In Tabelle 21 ist die jeweilige absolute Trialanzahl aufgelistet.

Tab. 21: *Versuchsdesign Experiment A1 „Happy vs. Sad"; angegeben ist die absolute Anzahl der Trials, die jede Versuchsperson in den jeweiligen Skripten in den beiden Blöcken bearbeitet hat.*

	1.Block (maskiert) „Diskrimination-Exp."	**2. Block (unmaskiert) „Reaktionszeit-Exp."**	**Trials insgesamt**
Skript 1 (20% *happy*)	16 *happy* / 64 *sad*	16 *happy* / 64 *sad*	160 (2x80)
Skript 2 (50% *happy*)	40 *happy* / 40 *sad*	40 *happy* / 40 *sad*	160 (2x80)
Skript 3 (80% *happy*)	64 *happy* / 16 *sad*	64 *happy* / 16 *sad*	160 (2x80)
Summe	120 *happy* / 120 *sad*	120 *happy* / 120 *sad*	480

[77] Zwei Vpn wurden wegen großer Müdigkeit bzw. bereits konsumierten Alkohols ausgeschlossen werden. Diese wurden jedoch ersetzt, so dass wie geplant von 18 Vpn psychophysische und pupillometrische Daten vorhanden waren und ausgewertet wurden.

[78] Die Sehschärfe wurde ermittelt mittels TITMUS, Vision Tester; Titmus Optical Co. Inc., Petersburg, Virginia.

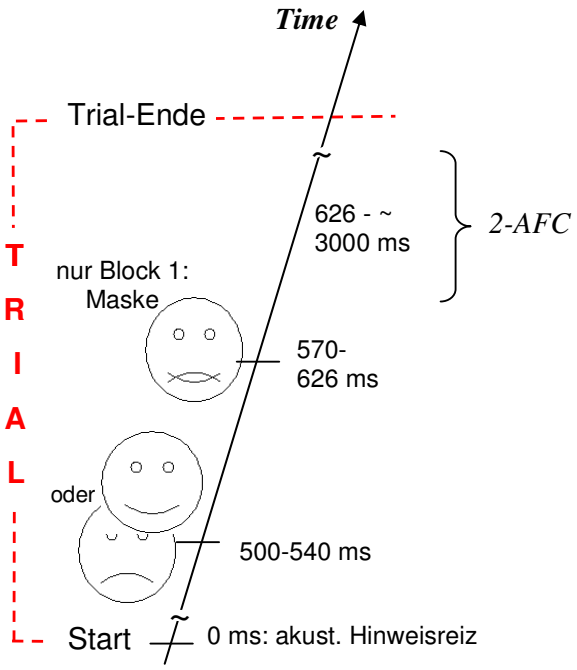


Abb. 46: *Zeitlicher Aufbau eines Trials im Experiment „Happy vs. Sad“*

Das experimentelle Setting ähnelte zwar dem der bisher dargestellten Experimente, unterschied sich aber in drei Dingen: Erstens wurde binokular, zweitens auf grauem Hintergrund und drittens foveal stimuliert.[79] Der Aufbau eines Trials im Einzelnen (Abb.46): Alle Trials begannen mit einem akustischen Hinweisreiz (500 Hz; ~40 dB); während die Vp den Mittelpunkt des Monitors fixierte, erschien für 40 ms[80] ein Smiley, entweder *happy* oder *sad*. Nach dieser kurzen Smiley-Darbietung blieb für 30 ms nur der Fixationspunkt zu sehen. Bei 570 ms post onset erschien die Maske für ca. 53 ms (4 Frames), jedoch nur in Block 1. Die Trials waren für jeden Durchgang[81] pseudo-randomisiert. Wir erkennen in Abbildung 47, dass die Stimuli zentral auf einem grauen Hintergrund (8cd/m²) dargeboten wurden und der Fixationspunkt als „Nase“ der Smileys gedacht werden konnte. Die Smileys selber waren kreisrund und hatten einen Durchmesser von 3,2° Sehwinkel. Die Stärke der Smiley-Ränder (Kopf, Mund und Augen) war mit ¾ pt (<0.09° Sehwinkel) sehr niedrig gewählt, so dass möglichst wenig Veränderungen in der Leuchtdichte während der Stimuluspräsentation auftreten würden. Die Farbe der Ränder war schwarz mit einer Leuchtdichte von ca. 0,5 cd/m².

[79] Der Grund für diese veränderte Versuchanordnung liegt darin, dass dieses Experiment chronologisch als erstes der beschriebenen durchgeführt wurde.
[80] Die Bildwiederholungsrate des Monitors betrug in diesem Experiment 75 Hz, sodass ein Frame ca. 13,3 ms betrug (1000ms/75Hz). Da die Software auf 30 ms Stimulusdarbietung programmiert war, endete das Bild nach 3 Frames, also ca. 40 ms.
[81] *Ein* Durchgang entspricht der Bearbeitung *eines* Skriptes.

6.2.4 B2: Versuchsdurchführung und Vp-Instruktion

Allen Vpn wurden zunächst zwei Fragebögen vorgelegt (wie im vorherigen Experiment; siehe Anhang). Es erfolgte ein Sehschärfe-Test mithilfe von Landoltringen, deren Öffnung in Form einer Uhrzeit angegeben werden sollte (z.B. 3 Uhr bei einer Öffnung rechts).

Waren die Antworten der Fragebögen und das Sehschärfe-Ergebnis zufriedenstellend, erhielt die Vp eine schriftliche Instruktion, die weitere Erklärungen zu dem Versuch (siehe Anhang) enthielt. Darin aufgeführt war auch die Information, dass die beiden zu diskriminierenden Stimuli insgesamt ***im gleichen Verhältnis*** erscheinen würden, aus Gründen, die in Experiment B1 schon dargelegt wurden. Aus der Notwendigkeit heraus, dass die Vpn bezüglich des ungleichen Verhältnis in Skript 1 und 3 naiv gehalten werden musste, ergab sich nun auch eine Einschränkung für die Abfolge des ersten und zweiten Blockes: Da letzterer ein Reaktionszeit-Experiment war, d.h. die Diskrimination in der Regel problemlos verlaufen sollte, hätten die Vpn leicht erkennen können, dass die Stimuli nur in *einem* Durchgang, nämlich in Skript 2 gleichwahrscheinlich präsentiert wurden, nicht aber in den anderen beiden Skripten. Aus diesem Grunde bearbeiteten alle Vpn zunächst die drei Durchgänge in Block 1 (Diskriminations-Experiment) und dann erst die von Block 2 (Reaktionszeit-Experiment).

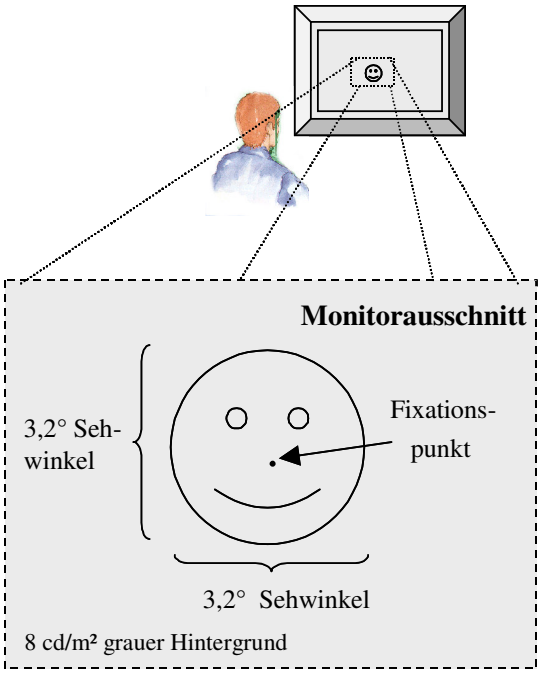


Abb.47: *Stimulusgröße und– lokation; darge-stellt ist beispielhaft der Stimulus „happy"; die Leuchtdichte des Hintergrund beträgt 8cd/m²*

Nachdem die Vpn die Instruktion gelesen und verstanden hatten, bearbeiteten sie zunächst ein Übungsskript, um sich mit der Aufgabe vertraut zu machen. Dieser Übungsdurchgang war zeitlich genauso aufgebaut wie die Durchgänge des ersten Experimentalblockes (siehe Abb. 46). Zusätzlich erhielten die Probanden ein akustisches Feedback unmittelbar nach ihrer Antwort bzw. ihrem Tastendruck (250 Hz-Ton für eine richtige und 1000 Hz-Ton für eine falsche Antwort). Dieses Feedback erfolgte aber nicht in der Experimentalphase. Der Übungsblock bestand aus 60 Trials, je 30 *happy*- und *sad*-Trials. Die Daten aus diesem Übungsblock wurden nicht ausgewertet.

Die Abfolge der Blöcke war aus o.g. Gründen also festgelegt: Erst Block 1, dann Block 2. Ausbalanciert wurden jedoch die drei Durchgänge *innerhalb* eines Blockes, die in sechs möglichen Abfolgen dargeboten werden konnten.[82] Die Skript-Abfolge wurde per Zufall zugeteilt, wobei je drei Vpn die gleiche Abfolge erhielten (6 Abfolgen x 3 Vpn =18 Vpn). Der zweite Block beinhaltete die gleiche Reihenfolge wie der erste.

Die Instruktion lautete inhaltlich wie folgt:

> *In den ersten drei Durchgängen entscheiden Sie bitte über Tastendruck, ob es sich bei dem Smiley um „happy" oder „sad" gehandelt hat. Sie müssen sich für eine Möglichkeit entscheiden. Insgesamt gesehen ist beides gleichwahrscheinlich. Die Reaktionszeit spielt hier keine Rolle, antworten Sie aber relativ spontan. Bei den Durchgängen 4, 5 und 6 sind die Smileys leichter zu erkennen und hier müssen Sie* ***so schnell wie möglich*** *den richtigen Tastendruck ausführen.*

Geantwortet wurde stets mit der dominanten Hand, die in diesem Experiment bei allen Vpn die rechte war. Die linke Taste (zur Hälfte der Vpn für *happy*, zur anderen für *sad*) wurde mit dem Zeigefinger, die rechte mit dem Mittelfinger gedrückt. Die Finger blieben während des gesamten Durchganges auf den entsprechenden Tasten, so dass der Blick nicht vom Fixationspunkt abweichen musste, um z.B. die richtige Taste ausfindig zu machen.

Alle Vpn wurden von zwei Versuchsleitern betreut: Einmal der Autor dieser Schrift (C.L.) und zum zweiten ein Studierender der Heinrich-Heine-Universität im Diplomstudiengang Psychologie. Letzterer wechselte nach je zwei Vpn (neun Studierende für insgesamt 18 Vpn).

Die Auswertung der Daten wurde ausschließlich von mir (C.L.) vorgenommen. Die Präsentations-Software war PRESENTATION® (Version 5.5), die Auswertungssoftware SPSS 11.0 sowie EXCEL (Microsoft Office, 2000).

[82] Die 6 Abfolge-Möglichkeiten ergeben sich aus 3! (gesprochen: Fakultät), also 3x2x1=6. Konkret: 1-2-3, 1-3-2, 2-1-3, 2-3-1, 3-1-2, 3-2-1.

6.2.5 B2: Ergebnisse (Psychophysik)

Die Daten des ersten Blockes wurden mit Blick auf die *Treffer*- und *Falsch-Alarm*-Raten untersucht. Hierbei ergab sich für die 18 Versuchspersonen im Mittel eine um ca. 28%-Punkte bessere *Treffer*- und *Falsch-Alarm*-Rate, angedeutet durch die horizontale Linie in Abbildung 48. Wie ferner in der Abbildung zu erkennen ist, unterscheiden sich die 18 Vpn erheblich in ihrer Entdeckungsleistung: von PB mit 61% bis zu DS mit 1%.

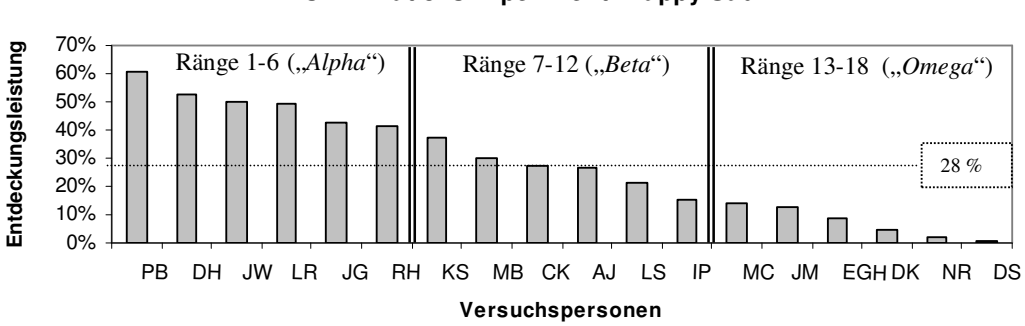


Abb. 48: *Psychophysisches Resultat des Diskriminations-Experimentes; siehe Text*

Analog zum vorherigen Experiment sind auch hier die Vpn in Gruppen zusammengefasst, die nach der Entdeckungsleistung a posteriori zusammengestellt wurden. Als ein weiteres Maß für die Entdeckungsleistung kann das Verhältnis der Antworten per se, d.h. die Betätigung der Tasten für *happy* bzw. *sad* herangezogen werden. Wie schon erläutert erhielten die Vpn die Information, dass beide Stimuli gleich häufig auftreten würden. Bezogen auf die einzelnen Skripte bzw. Durchgänge enthielt aber nur das Skript 2 ein 50:50-Verhältnis. Skript 1 und Skript 3 wichen von dieser Vorgabe ab. In welchem Verhältnis würden die Vpn diese Skripte bearbeiten? Wenn sie in ihrem Antwortverhalten bei der 50:50-Verteilung (wie instruiert) bleiben würden, könnte dies sowohl in einer strikten Befolgung der Instruktion begründet sein als auch in einer tatsächlich fehlenden Diskriminationsfähigkeit. Eine solche Verteilung ließe sich also nur schwer interpretieren. Im Falle einer Abweichung jedoch in die Richtung des tatsächlich dargebotenen Verhältnisses würde dies auch eine bewusste oder unbewusste Reaktion auf die tatsächlichen Verhältnisse implizieren.[83] Das Ergebnis ist in Abbildung 49 zu erkennen: Auf der Ordinate ist die Entdeckungsleistung wie in Abbildung 48 (in

[83] Selbst im Falle, dass die Vp ein ungleiches Verhältnis geahnt und / oder von anderen schon teilgenommenen Vpn erfahren hätte, wüsste sie nicht, in welcher Reihenfolge die Skripte erscheinen würden; dies entschied sich erst per Zufall kurz vor der Durchführung des Experimentes. Nichtsdestotrotz wurden alle Vpn angehalten, in den nächsten drei Wochen, d.h. für den Zeitraum der Untersuchung nicht über das Experiment zu sprechen.

Prozentpunkten) abgetragen, während die Abszisse ein Maß für die aus zwei Skripten (20:80 und 80:20) gemittelte Abweichung darstellt: Zu erkennen ist dabei ein inverser linearen Zusammenhang, der nach SPEARMAN einen Korrelationkoeffizienten von -.60 und einen p-Wert von p<.008 erreicht. In Abbildung 49 verweilend erkennen wir außerdem, dass sich die meisten Vpn (außer PB, JG, DH und JW) vertikal um eine 30 %-ige Abweichung (+/- ~5%) verteilen, was als Ausdruck der Diskrepanz zwischen Instruktion („Verhältnis ist 50:50“) und tatsächlich präsentierter Darbietung (20:80 bzw. 80:20) interpretiert werden kann.

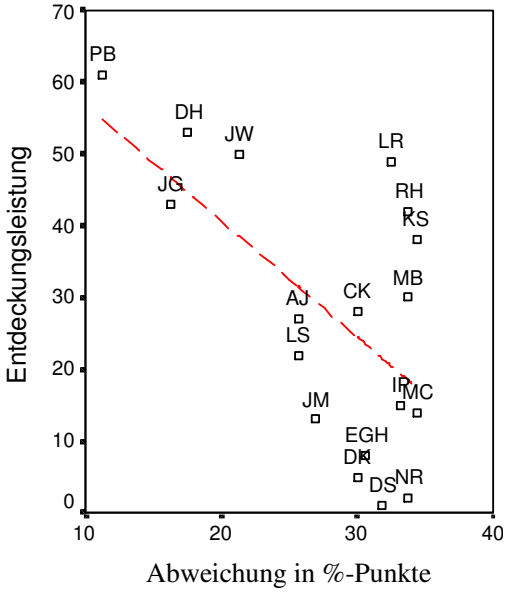


Abb. 49: *Diskriminations-Experiment; Abweichung der Antworthäufigkeit (in Prozent-Punkten) von der vorgegebenen Verteilung in den Skripten 1 und 3; siehe Text*

Die mittleren Reaktionszeiten aus dem 2. Block (Reaktionszeit-Experiment), in dem dieselben Reize nun *unmaskiert* gezeigt wurden, sind in Abbildung 50 zu ersehen: Zunächst sei darauf hingewiesen, dass die Fehlerrate (*Verpasser-* und *Falsch-Alarm-*Rate gemittelt) hier im Mittel bei 3,5 % (range: 0,8 - 8,0 %) liegt, was verdeutlicht, dass die Diskrimination im Allgemeinen kein Problem darstellte. Die Reaktionszeit für *happy*-Trials über alle drei Durchgänge gemittelt lag bei 541 ms, die entsprechende von *sad*-Trials bei 564 ms. Nach Prüfung auf statistische Voraussetzungen (hier: vergleichbare Streuung und Normalverteilung[84]) ergab die Berechnung des paarigen T-Tests ein signifikantes Ergebnis mit t_{17}=-2,618, p < .018, zweiseitig, angedeutet in Abb. 50 durch einen Stern (*).

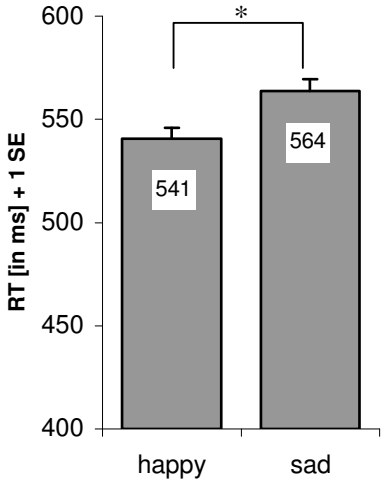


Abb. 50: *Reaktionszeit (RT)-Experiment: gemittelte RT von happy- und sad-Trials; siehe Text*

[84] Die Streuung betrug in Form der Standardabweichung 65,8 bzw. 64,5 ms und wurde als gleich angesehen. Die Normalverteilung der Reaktionszeiten (n=18) wurde mittels Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstest durchgeführt, der für *happy*-Trials einen z-Wert von .442; p-Wert < .99 (2-seitig) und analog für *sad*-Trials .521 bzw. .941ergab. Nach BORTZ und LIENERT (1998) können diese p-Werte als „gute Anpassung“ (S.70) auf eine Normalverteilung verstanden werden.

6.2.6 B2: Pupillometrie

Zentrale Bedeutung für diesen Ergebnisteil haben die Fragen, ob sich hinsichtlich der genannten Faktoren *Experiment*, *Stimulusvalenz* und *–Wahrscheinlichkeit* ein unterschiedliches Pupillenverhalten ermitteln lässt. In Abbildung 51a ist die Pupillenweite (Ordinate) des Diskriminations- und Reaktionszeitexperiment gegen die Zeit (Abszisse) abgetragen: Die vier Graphen repräsentieren dabei den Verlauf der Pupillenweite für die Faktoren *Experiment* und *Valenz*, im Reaktionszeit (RT)-Experiment anhand durchgezogener

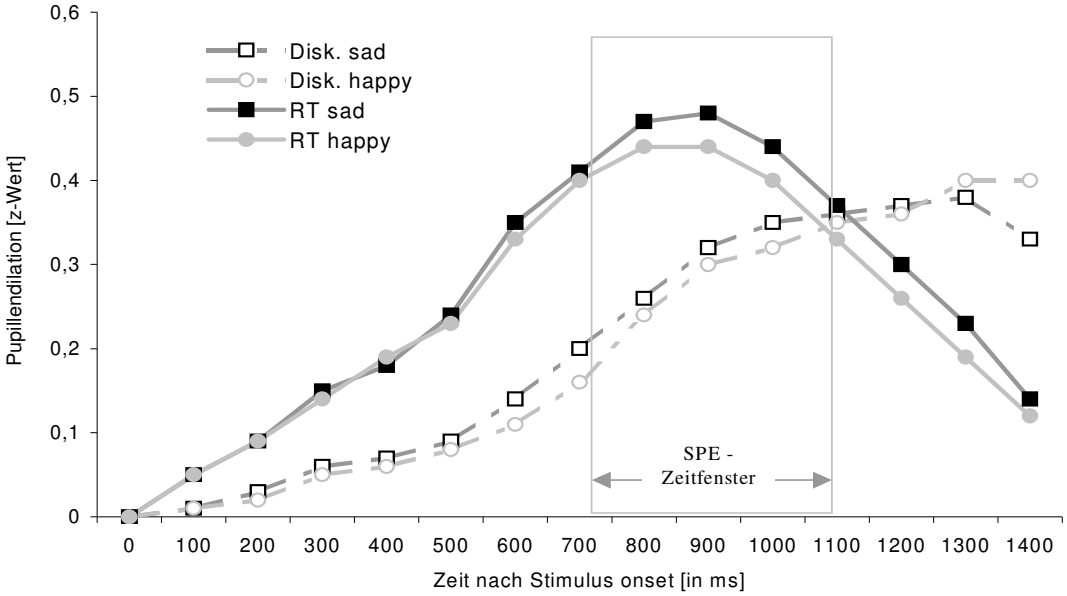


Abb. 51a. *Gemittelte Pupillendilatation auf happy (Kreise) und sad (Quadrate) Smileys, unabhängig von der Auftretenswahrscheinlichkeit; ausgefüllte Symbole stehen für das Reaktionszeit-, nicht ausgefüllte für das Diskriminations-Experiment.*

Abb. 51b*: Direkter Valenz-Vergleich der Pupillenamplitudenhöhe im SPE-Fenster von 751-1150 ms nach onset (siehe Text)*

Graphen mit ausgefüllten Symbolen für alle *sad*- und *happy*-Trials, für das Pendant im Diskriminations-Experiment anhand gestrichelter Graphen und mit nicht-ausgefüllten Symbolen. Deutlich zu sehen ist ein Latenzunterschied zwischen dem Pupillenverhalten im RT- und Disk-Experiment: Während die maximale Amplitude im erstgenannten Experiment tatsächlich in das SPE-

Zeitfenster hineinfällt, dilatiert die Pupille im anderen Experiment langsamer und – so weit beurteilbar – weniger stark.

Wir erkennen ferner, dass sich *innerhalb* eines Experimental-Blocks die Amplitudenhöhe der Graphen nur wenig unterscheiden: Für das RT-Experiment liegt sie innerhalb des SPE-Zeitfensters in der Größenordnung von 0,44 (*sad*) bzw. 0,40 (*happy*) z-Wert Einheiten; analog dazu im Diskriminations-Experiment bei 0,32 und 0,30 Einheiten (Abb. 51b).

Wie in unten stehender Tabelle 22a ersichtlich erzielen die angesprochenen Amplituden-Unterschiede für die Faktoren *Experiment* und *Valenz* p-Werte von p< 0,033 bzw. 0,142. Da wir dieselben Daten für eine weitere ANOVA bemühen müssen (SPE-Vergleich bei *Alpha* – und *Omega*-Probanden), adjustieren wir das Signifikanz-Niveau auf 0,025 (0,05/2), das die Faktoren *Experiment* und *Valenz* nicht unterschreiten konnten. Aus Tabelle 22a ist ferner zu ersehen, dass die Auftretenswahrscheinlichkeit der Stimuli (WKT) den einzigen signifikanten Effekt dieser inferenzstatistischen Berechnung erzielen konnte (p <.023). Die Daten sind deswegen in Abbildung 52a nach diesem Kriterium geordnet und graphisch dargestellt; zur besseren Übersicht einmal für den Block 1 (Disk-Experiment, gestrichelte Graphen) und zum anderen für den Block 2 (RT-Experiment; durchgezogene Graphen). Die Graustufen hell, mittel und dunkel stehen für die Auftretenswahrscheinlichkeiten 20%, 50% und 80 % respektive.

Tab. 22a: *Ergebnisse der 3-faktoriellen Varianzanalyse mit Blick auf die gemittelte Pupillendilatation im SPE-Zeitfenster*

Faktor	df	F	p-Wert
Experiment	1; 17	5,353	0,033
Valenz	1; 17	2,367	0,142
WKT	2; 34	4,221	0,023 *
Experiment x Valenz	1; 17	0,112	0,742
Experiment x WKT	2; 34	0,531	0,593
Valenz x WKT	2; 34	2,404	0,106
Exp. x Valenz x WKT	2; 34	0,094	0,910

* post hoc Test: siehe Tab. 22b

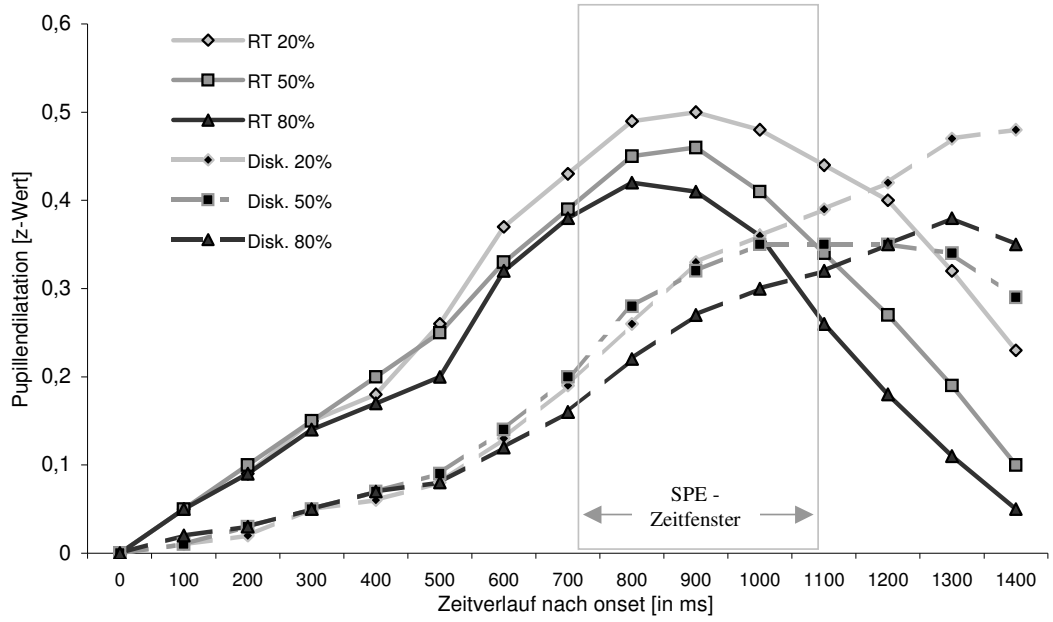


Abb. 52a*: Der Zeitverlauf des Pupillendurchmessers in Abhängigkeit von der Stimulus-Auftretenswahrscheinlichkeit, getrennt für das Disk.- (gestrichelte Linie) und das RT-Experiment (durchgezogene Linie).*

Ausschließlich auf das SPE-Zeitfenster fokussiert ergeben sich Mittelwerte von 0,38, 0,36 und 0,32 z-Wert Einheiten, die in Form eines Säulendiagramms in Abbildung 52b dargestellt sind. Bonferroni-adjustierte posthoc Vergleiche (siehe Tabelle 22b; Abb.52b) ergeben einen signifikanten Unterschied von der 20%- zu der 80%-Bedingung, angedeutet durch einen Stern (*). Die übrigen posthoc p-Werte sind nicht signifikant.

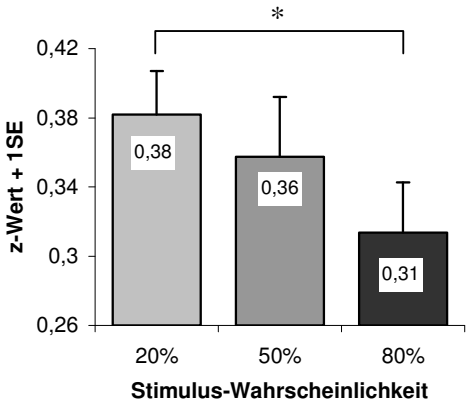


Abb.52b: *Balkendiagramm für die gemittelten Amplitudenunterschiede im SPE-Zeitfenster für das RT- und Disk-Experiment gemeinsam.*

Tab. 22b*: Posthoc-Vergleiche für den Haupteffekt WKT (s.o.)*

post hoc Vergleiche	p-Wert
20% vs. 50%	1,000
20% vs. 80%	0,044*
50% vs. 80%	0,156

* signifikant; Bonferroni-korrigiert

Zu beachten ist, dass die jeweils selten dargebotenen Stimuli *zusammen* eine Gruppe bildeten: in Skript 1: *happy*, in Skript 3: *sad*. In gleicher Weise wurden die häufig dargebotenen Reize zusammengefasst (in

Skript 1: *sad*, in Skript 3: *happy*), so dass in die Berechnung der o.g. ANOVA drei „neue" Gruppen entstanden sind: Stimuli mit 20%, solche mit 50% und schließlich jene mit 80% Darbietungswahrscheinlichkeit. Diese Aggregation von Daten impliziert einerseits, dass Valenzunterschiede unberücksichtigt bleiben (da kein signifikanter Valenz-Effekt vorliegt), und andererseits, dass sich die Datenmenge für die entscheidende Fragestellung verdoppelt: Insbesondere die Gruppe der selten dargebotenen Stimuli, die in den 20% und 80 %-Skripten ja mit (nur) je 16 Trials vertreten sind, erhöht sich nun auf 32 Trials.[85]

Kommen wir nun zu der Frage, inwieweit die Pupillen- und Verhaltensdaten korrespondieren.

6.2.7 B2: Korrespondenz der Psychophysik und Pupillometrie

Wie schon oben angekündigt wollen wir Vpn-Gruppen zusammenstellen, die als *Alpha-*, *Beta-* und *Omega-Gruppe* (hohe, mittlere und niedrige Entdeckungsleistung, respektive) benannt sind. Zentrale Frage ist, inwieweit die *psychophysische* Entdeckungsleistung (*Treffer-* minus *Falsch-Alarm*-Rate) der *pupillometrischen* (SPE) entspricht. Die nachfolgenden Daten stammen daher nur aus dem Diskriminations-Experiment (Block 1). Da ausschließlich in der 20% vs. 80%-igen Darbietung ein signifikanter SPE ermittelt wurde, vergleichen wir nachfolgend diesen Kontrast nur bei *Alpha-* und *Omega*-Probanden, die im Mittel eine 49%-Punkte bzw. 7%-Punkte bessere *Treffer-* als *Falsch-Alarm*-Rate erzielten. Abbildung 53*a* (oben) zeigt den Verlauf der Pupillenreaktionen in Abhängigkeit von der Stimulus-Auftretenswahrscheinlichkeit: Vergleichbar ist die Latenz bis zum Amplitudenmaximum, das bei allen vier

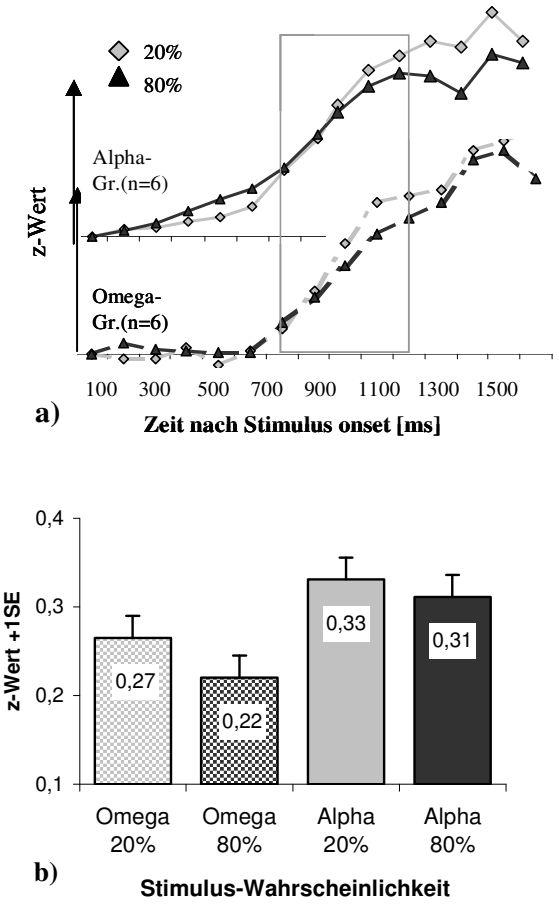


Abb. 53: *Diskriminations-Experiment: Pupillenverlauf (**a**) und SPE (**b**) bei Alpha- und Omega-Probanden (siehe Text)*

[85] In diesem Zuge sei auch schon darauf hingewiesen, dass für die folgende Analyse eine ungleiche Trialanzahl, nämlich die schon erwähnten 32 Trials für die 20%-, 80 Trials für 50%- und 128 Trials für 80%-Bedingung.

Graphen *hinter* dem SPE-Zeitfenster bei ca. 1500 ms erfolgt.[86] Die oberen beiden Graphen[87] sind die der *Alpha*- Probanden und weisen eine wahrscheinlichkeitsabhängige Dilatation erst ab ca. 1000 ms post onset auf. Die beiden unteren Graphen sind die der *Omega*-Probanden: Mit Blick auf die gemittelte Amplitudenhöhe im SPE-Zeitfenster - wie in Abb. 53b dargestellt – erkennen wir zwar, dass die *Alpha*-Gruppe mit 0,33 und 0,31 z-Wert Einheiten im Mittel mehr Dilatation als die *Omega*-Gruppe mit 0,27 und 0,22 aufweist; allein die Differenz betrachtend können wir jedoch keine signifikanten Unterschiede zwischen den 20%- und 80%-Bedingungen innerhalb der Gruppen ausmachen (Wilcoxon, 2-seitig; *Alpha*-Gruppe: z= - ,943; p< ,345; Omega: z= -,526; p< ,599). Die *Omega*-Gruppe spiegelt entgegen der Erwartung beim SPE einen sogar geringfügig stärkeren Effekt wider (0,27-0,22=0,05) als die *Alpha*-Gruppe (0,33-0,31=0,02).

6.2.8 B2: Diskussion

Die *psychophysische* Diskriminations- bzw. Entdeckungsleistung variierte zwischen den 18 Vpn erheblich: Sie reichte von nahezu 1% bis über 61%. Im zweiten Experimentalblock (RT-Experiment) hatte keiner der Probanden Schwierigkeiten in der Diskrimination. Die Reaktionszeitanalyse ergab eine signifikant langsamere Antwort in *sad*- als in *happy*-Trials, ein Befund, der pupillometrisch keine Entsprechung fand.

Die Varianzanalyse der Pupillendaten erbrachte mit Blick auf Amplitudenunterschiede im SPE-Zeitfenster für den Faktor *Stimulus-Wahrscheinlichkeit* ein signifikantes Ergebnis: Insbesondere die Gegenüberstellung der 20%- und 80%-Bedingung ließ sich statistisch vom Zufall abgrenzen. Allein das Diskriminations-Experiment betrachtend war dieser pupillometrische SPE-Effekt *weder* für die psychophysisch erfolgreicheren (*Alpha*-Gruppe), *noch* für die vergleichsweise weniger erfolgreichen Probanden (*Omega*-Gruppe) signifikant. Schließlich wurden mit Blick auf den Verlauf der Pupillenreaktionen deutliche Unterschiede zwischen Diskriminations- und Reaktionszeitexperiment festgestellt; im letzteren fand das Amplitudenmaximum im SPE-Zeitfenster statt, im erstgenannten danach.

Die Frage, ob der SPE auch bei schwellennaher Reizpräsentation auftritt kann aufgrund der vorliegenden Daten nicht eindeutig beantwortet werden: Wir finden zwar einen signifikanten Haupteffekt für den Faktor Wahrscheinlichkeit (WKT) vor, dieser scheint jedoch zu einem nicht geringfügigen Anteil auf die Pupillenreaktionen im RT-Experiment zurückzugehen, denn für den Diskriminationsteil separat betrachtet verlieren die Pupillendaten ihre

[86] Der weitere Verlauf der Graphen kann nicht rekonstruiert werden, da der nächste Trial schon begann.
[87] Die oberen beiden Graphen sind auf der Ordinatenachse versetzt, um den Verlauf übersichtlicher zu gestalten.

Überzeugungskraft und münden in p-Werte jenseits der akzeptierten Fehlerrisikogrenze von 5%. Somit kontrastieren diese Daten die Ergebnisse von HAKAREM und SUTTON (1966), die bei erkannten, nicht aber bei übersehenen Lichtreizen eine Pupillenreaktion hatten festmachen können. Wenn davon ausgegangen wird, dass die Pupillendilatationen der Alpha-Probanden vergleichbar sind mit jenen Dilatationen von HAKAREM & SUTTONs Probanden, die den Stimulus richtigerweise entdeckt hatten, sollte zu fordern sein, dass die hiesige Alpha-Gruppe (mit gemittelten 49%-Punkte Entdeckungleistung) einen stärkeren SPE aufweisen als die Omega-Probanden (7%-Punkte gemittelte Entdeckungsleistung). Da dies in diesem Experiment nicht der Fall war, kann eine Korrespondenz von der psychophysischen Entdeckungsleistung und der *späten* Pupillenreaktion (SPE) nicht angenommen werden. Andererseits muss berücksichtigt werden, dass sich eine deutlich unterschiedliche Latenz in der Pupillenreaktion ermitteln ließ, deren Amplitudenmaximum jenseits des SPE-Zeitfensters lag. Dem Kurvenverlauf nach hätte sich möglicherweise für ein späteres Zeitfenster ein Effekt gezeigt. Warum im Diskriminations-, nicht aber im Reaktionszeitexperiment dieser späte Pupillenweitezuwachs eintrat ist völlig unklar, zumal in zuvor beschriebenen Experimenten (mit normal- und sehgeschädigten Probanden) bei ähnlich schwierigen Entdeckungsaufgaben i.d.R. keine auffällig hohe Latenz zu eruieren war. Eine Erklärung könnte die Darbietung der speziellen Maske sein, da sie - als zusätzlicher und irritierender visueller Reiz - die Diskrimination erschwert hatte. Dieses Argument zählt aber nur für den Vergleich zum RT-Experiment, nicht für den Vergleich der maskierten Bedingung in Experiment B1. Möglicherweise spielte aber auch der Zeitdruck im RT-Experiment eine wichtige Rolle für die Latenz, da hier möglicherweise eine erhöhte Wachsamkeit auch die Pupillenbewegung beeinflusst haben könnte.

Auch in der Abfolge der beiden Experimental-Blöcke könnte ein Grund liegen, denn das Diskriminations-Experiment wurde immer *vor* dem RT-Experiment durchgeführt. Bei einem solchen Reihenfolge-Effekt wäre zu befürchten, dass Probanden in der ersten Hälfte des Experimentes auf Pupillenebene anders reagierten als in der zweiten Hälfte. Aufmerksamkeits- oder Motivationseffekte würden hier aber eher für den ersten Teil schnellere bzw. sensitivere Reaktionen erwarten lassen, da häufig wiederholte Stimuli i.d.R. zu einer Habituation führen: Der Vergleich der Pupillendaten zeigte jedoch, dass das Pupillenverhalten im zweiten Teil „agiler“ war, zumindest was Amplitudenhöhe angeht.

Ebenfalls bietet sich als Einflussfaktor der Grad der visuellen Bewusstheit an, der im RT-Experiment höher gewesen sein dürfte. In einem solchen Falle hätte sich jedoch im Diskriminations-Experiment der Verlauf der Pupillenweite bei *Alpha*-Probanden dem des RT-

Experimentes angleichen müssen, da ja bei dieser Gruppe in der Diskrimination nur wenige Fehler gemacht wurden. Tatsächlich aber ist das Pupillenverhalten der *Alpha*-Probanden im Verlauf dem der *Omega*-Probanden auffällig ähnlich.

Warum *sad* signifikant langsamer beantwortet wurde als *happy* bleibt unklar: Da dieser Befund nicht gezielt untersucht worden war[88], sollte er nur als Randnotiz vermerkt und in anderen Studien untersucht werden.

Was allerdings bleibt ist der Befund, dass eine seltene Stimulusdarbietung mehr Dilatation im SPE-Fenster verursacht als eine 80%-ige, womit der akustisch evozierte SPE-Befund von QIYUAN und Kollegen (1985) nun auch auf die visuelle Modalität übertragen werden kann.

Die Frage, in wie fern die unterschiedliche psychophysische Entdeckungsleistung ein geeignetes Maß für die visuelle Bewusstheit darstellt, wird in der anschließenden Allgemeinen Diskussion behandelt.

[88] Das RT-Experiment wurde durchgeführt, um den SPE bei bewusster Abbildung zu untersuchen. Damit die Vpn ähnlich „aktiv" sind wie im Disk-Experiment, wurde ihnen die Aufgabe gestellt, so schnell wie möglich zu reagieren. Die Reaktionszeit war jedoch – zumindest in der Planungsphase - unerheblich, denn es ging vornehmlich darum, zu erkennen, ob die Diskrimination erfolgreich war.

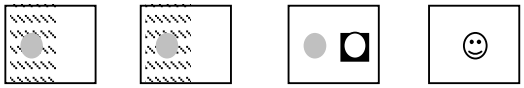
7.0 Allgemeine Diskussion (A1, A2, B1, B2)

Die Ergebnisse der vier Experimental-Teile sind, was den SPE angeht, heterogen. Nach einer kurzen Zusammenfassung wird diskutiert, inwiefern sich ein SPE bei normaler, reduzierter und fehlender Reizabbildung ausbildet. Im Anschluss werden die Ergebnisse zu publizierten Blindseh-Befunde in Beziehung gesetzt. Zuletzt werden methodische Überlegungen sowie Anwendungsaspekte angesprochen.

7.1 Ergebnisse im Überblick

Wenn visuelle Reize (graue Scheibe bzw. Smiley) gut sichtbar (im gesunden Feld bzw. unmaskiert) dargeboten wurden – wie in den Experimenten A1 und B2 -, wurde bei allen Probanden ein signifikanter SPE ermittelt (‚++' in Tab.23). Dieser Pupilleneffekt zeigte sich unabhängig von der Leuchtdichte des Reizes; die physikalischen Reizeigenschaften spielten also keine (bzw. eine nur untergeordnete) Rolle. Wurden dieselben Reize maskiert (Exp. B1, B2), zeigte sich im Mittel eine überzufällige Entdeckungs- bzw. Unterscheidungsleistung, denn die Trefferrate lag ca. 20%-Punkte höher als die *Falsch-Alarm*-Rate. Um hier eine voreilige Zuordnung zugunsten einer völlig fehlenden oder einer normalen, bewussten Reiz-Abbildung zu vermeiden, wurden die gewonnenen Pupillendaten „reduzierten" Sehbedingungen zugeordnet. Es zeigte sich unter diesen Bedingungen, dass solchermaßen reduzierte Abbildungen in B1 keinen, in B2 jedoch einen signifikanten SPE nach sich zogen. In B2 zeigte allerdings der Vergleich der *Alpha*- und *Omega*-Probanden im maskierten Diskriminations-Teil kaum einen Unterschied in der SPE-Höhe. Dies könnte an dem vergleichsweise späten Amplitudenmaximum gelegen haben, das außerhalb des SPE-Zeitfensters lag. Bezüglich B1 kann zunächst gesagt werden, dass mit Blick auf die 2-AFC und SPE-Daten weder der Vergleich von links- und rechtshemisphärisch, noch von retino-nasal und -temporal untersuchten Probanden einen signifikanten Unterschied erbrachte. Was die psychophysische

Tab. 23: *Zusammenfassung der Ergebnisse zum Vorliegen eines SPE in Abhängigkeit von der Güte der Reizabbildung; Legende: „++": Signifikanz; „+": Tendenz; „-": fehlende Tendenz; „?": nicht untersucht.*



SPE?	Exp. A1 Pat-Gruppe	Exp. A2 Einzelfall	Exp. B1 Gruppe	Exp. B2 Gruppe
Normale Abbildung	++	? | + | ?	?	++
Reduzierte Abbildung		+ | - | - [1]	-	++
Fehlende Abbildung	++			

[1] unklar, ob Daten zu reduzierter oder fehlender Abb. zählen; siehe Text

Entdeckungsleistung im Vergleich zwischen erstem und zweitem Block anging, war jedoch eine signifikante – und Voruntersuchungen zufolge auch zu erwartende (Breitmeyer & Ogmen (2000), - Verbesserung zu ermitteln (17 von 20 Vpn konnten ihre Entdeckungsleistung verbessern): Jene Vpn, die sich im besonderen Maße verbesserten („Lerner"), zeigten zudem einen stärkeren SPE als die der Vergleichsgruppe mit niedriger Verbesserungsrate („Nicht-Lerner"); bei letzteren blieb der SPE (auch deskriptiv) aus. Die Zunahme des SPE bei steigender psychophysischer Entdeckungsleistung stärkte wiederum die Annahme, dass das Gewahrwerden von Reizen und die Ausbildung von Pupillenreaktionen eine zumindest teilweise korrespondierende Komponente aufweisen (vgl. Korrespondenz-Beschreibung von Weiskrantz, 1999, Punkt 3.4.2)

Die Daten der Einzelfall-Studie (Exp. A2) sind mit Blick auf die Abbildungs-Güte schwierig einzustufen (reduzierte oder fehlende Reizabbildung): Der erste Teil des Experimentes ergab, dass sich Dilatationen bei einer Stimulus-Wahrscheinlichkeit von 35%, 50% und 65% im großen und ganzen größenmäßig zwischen die 20%- und 80%-Bedingungen einordnen lassen. Auffällig war indes, dass sich in der pupillometrischen Gegenüberstellung von *Verpassern* und *Korrekten Zurückweisungen* ein tendenzieller SPE ermitteln ließ. Psychophysisch haben wir in diesen Trials keinen Unterschied (beides ‚*Blank'*-Antworten), pupillometrisch aber schon (Tab. 23, ‚+' an 1. Stelle). Im zweiten Teil wurde eine naso-temporale Asymmetrie zugunsten der nasalen Retinahälfte ermittelt; hier lag die Entdeckungsrate ca. 20 Prozentpunkte über der der entsprechenden temporalen Retinastimulation. Dieser Befund ließ sich in der normalsichtigen Stichprobe (Exp. B1) *nicht* replizieren, worauf wir noch eingehen werden. Pupillometrisch erwies sich HKs temporale Retinahälfte ebenfalls weniger effektiv bzw. pupillenwirksam, da hier nur einer von vier Target-Blank-Gegenüberstellungen auf einen SPE schließen ließen (‚*Target'* in Target-20%-Bedingung). Die Folge ist, dass sich die Psychophysik im Vergleich zur Pupillometrie als sensitiver darstellte (Tab.23; ‚-` an 2. Stelle).

Im dritten Teil wurde der Einfluss der Aufmerksamkeit unter passiven Bedingungen untersucht: HK zeigte dabei in der Target-20%-Bedingung einen signifikanten SPE, in der Target 80%-Bedingung nicht. Da ein SPE, der nur in der 20%-Target Bedingung auftritt, prinzipiell auch mit einem Pupillenlichtreflex erklärt werden könnte – wobei hier die hohe Latenz gegen einen PLR spricht - , wird in Tab.23 an 3. Stelle wegen nicht überzeugender SPE-Hinweise ein ‚-` eingetragen. Insgesamt sprechen die Ergebnisse der Einzelfallstudie eher dafür, dass die Psychophysik (2-AFC) implizite Informationsverarbeitungsvorgänge gleich gut oder sogar besser als die Pupillometrie (SPE) widerspiegeln kann.

Wenn die Reizabbildung jedoch fehlte – wie in Experiment A1, in dem alle Patienten jegliches Erleben eines Perzept negierten – ergaben die Ergebnisse im 2-AFC-Verfahren, dass zwei von sieben Patienten signifikant die Target-Reize entdecken konnten, im pupillometrischen Verfahren jedoch waren es in der Target-80%-Bedingung sechs von sieben. Der Patient, der dort keinen signifikanten SPE aufwies, war HK, dessen psychophysische Entdeckungsleistung so gut war, dass dessen Pupillendaten – ähnlich die der normalsichtigen Probanden in der maskierten Bedingung - unter reduzierter Reizabbildung eingeordnet worden war (s.o.).

7.2 Beziehungen von SPE, visueller Bewusstheit und psychophysischer Leistung

Kommen wir nun zu der Frage, in welchem Verhältnis die pupillometrischen (SPE) und psychophysischen (2-AFC) Daten sowie die visuelle Bewusstheit zueinander stehen: Abbildung 54 visualisiert in einem Pfeildiagramm diese Fragestellung: Darin steht der Reiz bzw. dessen Verarbeitung am Anfang (links), und zu untersuchen ist, auf welcher Ebene (Pupille [1], visuelle Bewusstheit [2] oder Verhalten [3]) die Reizverarbeitung (am ehesten) stattfindet. Im Falle der normalen Reizabbildung (Exp. A1, B2) konnte keine Dissoziation festgestellt werden: Die Stimuli erzeugten sowohl einen signifikanten SPE, wurden (bewusst) gesehen und - entsprechend der Instruktion – richtig beantwortet, was in Abb. 54 durch drei Gleichheitszeichen (‚=') an jeweils erster Stelle von [4], [5] und [6] symbolisch dargestellt ist. Unter reduzierten Bedingungen zeigten sich jedoch Dissoziationen, denn hier fanden wir bei deutlichen Unterschieden auf Verhaltensebene (Entdeckungsleistung der *Alpha*- vs. *Omega*-Probanden) in Experiment B1 einen (nur) tendenziellen und in B2 überhaupt keinen Unterschied im SPE. Hier muss also die Psychophysik (hohe Entdeckungsleistungen der *Alpha*-Probanden bei geringem bzw. fehlendem SPE) als sensitiver eingestuft werden. Mit Blick auf Abbildung 54 stellt sich dieser Befund so dar, dass der (reduziert abgebildete) Reiz sich

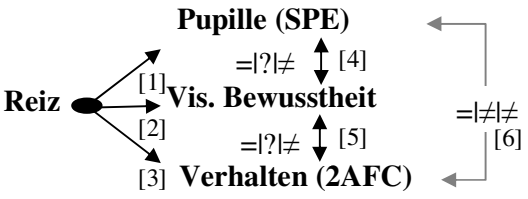


Abb. 54*: Schematische Darstellung zur Frage, inwieweit pupillometrische (SPE) und psychophysische (2-AFC) Daten sowie visuelle Bewusstheit zusammenhängen„≠" bedeutet , dass eine Dissoziation aufgrund der hier erhobenen Daten möglich ist, = bedeutet, dass keine Dissoziation nachgewiesen wurde; ‚?' Beziehung ist unklar; die Reihenfolge x|x|x gibt das Resultat der normalen, reduzierten und fehlenden Reiz-Abbildung wider; Zahlen in eckigen Klammern beziehen sich auf Ausführungen im Text.*

hauptsächlich auf Verhaltensebene [3] auswirkt; und dieser Effekt zeigt sich vom SPE [6] weitgehend dissoziiert (≠ bei [6], 2. Stelle). Ob in der reduzierten Bedingung von einer visuellen Bewusstheit auszugehen ist, wird weiter unter diskutiert; hier erscheinen an den Verbindungen [4] und [5] deswegen ein Fragezeichen („?“).

Bei fehlender Reiz-Abbildung (Exp. A1) zeigte sich, dass der SPE und das psychophysische Antwortverhalten *nicht* übereinstimmten, denn die SPE-Daten erwiesen sich als deutlich sensitiver als die Daten aus dem 2-AFC-Verfahren (Abb.54; ≠ bei [6], 3. Stelle). Die Dissoziation (zugunsten des SPE) zeigt sich aber nicht nur im Vergleich zu den Verhaltensdaten, sondern auch zur visuellen Bewusstheit (≠ bei [4], 3. Stelle), denn die meisten Patienten (5 von 7) gaben mehrfach und überzeugend zu verstehen, dass sie in keinster Weise einen Seheindruck während der Stimulation gehabt hatten (zur Erfassung der visuellen Bewusstheit, siehe Punkt 7.4). Andererseits muss festgehalten werden, dass zwei Patienten die Reize überzufällig entdecken konnten, obwohl – ihren Aussagen zufolge – keine visuelle Bewusstheit vorlag (≠ bei [5], 3. Stelle). Es liegt also auch hier eine Dissoziation vor, wie sie das Phänomen des Blindsehens ja auch beschreibt. Interessanterweise zeigte aber nur einer dieser psychophysisch signifikanten Patienten (DH) auch einen signifikanten SPE HK hingegen, dessen Entdeckungsleistung von allen untersuchten Patienten am höchsten war, zeigte einen (nur) tendenziellen SPE. Es liegt also wiederum – wie bei der reduzierten Reiz-Abbildung in Exp. B1 und B2 ein Resultat vor, nach dem die 2-AFC-Ergebnisse sensitiver die Reizdarbietung widerspiegeln als der SPE.

7.3 Ergebnisdarstellung im Lichte vorheriger Blindseh-Studien

Der Leser, der mit dem Phänomen „Blindsehen“ vertraut ist, wird sich zunächst fragen, warum nur zwei von sieben Patienten psychophysisch überzufällig reagierten: Dieser Befund verwundert insofern, als dass die Inzidenzrate von Blindsehfähigkeiten in Tierstudien mit nahezu 100% (Stoerig & Cowey, 1997) und in Patientenstudien mit bis zu 60% (Weiskrantz, 1980) bzw. 60 bis 80% (Stoerig, 1987) angegeben wird. Bei diesen Angaben müssen allerdings einige Aspekte berücksichtigt werden: Wie schon eingangs dargestellt, werden i.d.R. bewegte und kontrastreiche Stimuli eher lokalisiert und diskriminiert als stationäre und kontrastarme; zur letzteren Gruppe zählt das hier verwendete Stimulusmaterial. Hinzu kommen Variationen in der Stimulusgröße, –darbietungszeit, -wellenlänge und Exzentrizität, die Vergleiche *zwischen* den Blindseh-Studien erschweren. Von großer Bedeutung scheinen aber auch individuelle Faktoren wie das Läsionsalter, -ausmaß und der Ort der Schädigung zu spielen: Im Gegensatz zu Tierstudien, deren Kortex inzwischen scharf umgrenzt chirurgisch

lädiert werden kann, sind Läsionen von Patienten häufig diffus und nicht auf funktionelle Areale beschränkt; auch dieser Umstand macht einen Daten-Vergleich von Patient X zu Patient Y sehr schwierig. Schließlich mag auch das Ausmaß der transneuronalen Degeneration eine Rolle spielen: Bei einem stärkeren retinalen Zelluntergang könnte auch mehr Residualsehen eingebüßt werden. Und zu guter Letzt spielt auch die Blindseh-Erfahrung eine Rolle: So berichten beispielsweise STOERIG and COWEY (1997) von dem Patienten FS (der auch in dieser Studie teilnahm), dass er sich im Laufe der Jahre in seinen Blindseh-Funktionen erheblich verbesserte. Die Blindseh-Studien unterscheiden sich zudem nicht nur durch die Patienten, die untersucht wurden, sondern auch in methodischen Belangen: Einflussnehmende Faktoren können sein, dass gelegentlich *mit* Feedback experimentiert wurde (i.d.R ohne Feedback) oder andere Hilfestellungen wie die Darbietung eines Hinweisreizes variiert wurden (für einen Überblick siehe Stoerig & Cowey, 1997, Weiskrantz, 1999).

In diesem Experiment könnte ein zusätzlicher Grund für die (niedrige) psychophysische Entdeckungsrate das relativ lange Intervall zwischen akustischem Hinweisreiz und visuellem Stimulus (500 ms) wichtig sein: Gewöhnlich kommt der Hinweisreiz *unmittelbar* vor dem visuellen Stimulus und diese enge zeitliche Verknüpfung könnte beispielsweise in kollikulären (Colliculus superior) oder supramodalen cortikalen Strukturen (z.B. im Parietallappen) eine Integration von akustischen und visuellen Stimuli begünstigen, was für eine verhaltensrelevante neuronale Antwort auf den visuellen Reiz bahnend wirken könnte. Wenn allerdings die zeitliche Nähe für das 2-AFC-Ergebnis eine modifizierende Rolle spielt, könnte dies prinzipiell auch für Pupillenreaktionen von Belang sein, da diese ja ebenfalls subkortikal gesteuert werden. Möglicherweise würde also eine engere Verknüpfung von Hinweiston und visuellem Reiz (<500 ms) die Entdeckungsrate verbessern. Die vergleichsweise große Zeitdifferenz von 500 ms wurde ja gewählt, um Pupillenreaktionen, die nach visueller Stimulation entstehen, besser von solchen unterscheiden zu können, die vom akustischen Reiz ausgelöst werden.

Ein anderer Faktor, der sich negativ auf die psychophysische Leistung ausgewirkt haben kann, ist der negative Kontrast aller verwendeten Reize (dunkler Reiz auf hellem Hintergrund). Der Vorteil lag zwar darin, dass weniger Streulichtgefahr bestand: Überzufällige Leistungen wurden nämlich von einigen Kritikern dadurch erklärt, dass Streulicht in funktionstüchtige Gesichtsfeldanteile fallen könnte (Campion et al, 1983). Diese Bedenken bzw. Erklärungsversuche für das Phänomen des Blindsehens konnten jedoch zurückgewiesen werden, nachdem in Kontrollexperimenten Reize innerhalb des natürlichen

blinden Flecks präsentiert wurden; überzufällige Leistungen hätten hier nur durch Streulicht erklärt werden können. Waren die Reize jedoch nicht überzufällig entdeckbar, dann konnte ihre Entdeckung im (erworbenen) Gesichtsfeldausfall nicht durch Streulicht bedingt sein (vgl. Stoerig, 2003).

Ein Nachteil des negativen Kontrastes könnte allerdings darin bestehen, dass der selektive Zelluntergang des parvozellulären Pfades, wie er von Cowey et al. (1989) beschrieben wurde, mit einer Einbuße im Kontrastsehen eingeht, und zwar hauptsächlich beim negativen Kontrast-Sehen (Schiller et al. 1990); durch den selektiven Pß-Ganglienzell-Verlust kann dann auch ein Nachteil für die Entdeckungsleistung entstanden sein. Hierzu gibt es bislang keine systematischen Untersuchungen.

Mit Blick auf die Untersuchung einer naso-temporalen Asymmetrie im gesunden Feld konnte für HK – was den Vergleich der Pupillenreaktion der nasalen und temporalen Retinahälfte angeht - ein vergleichbarer SPE ermittelt werden. In der Kontrollgruppe in Exp. B1 wurden die Pupillenreaktionen bei *normaler* Reizabbildung nicht untersucht, weswegen kein direkter Vergleich zu HKs Daten möglich ist. Es zeigte sich jedoch, dass die nasal untersuchten Probanden unter Metakontrast-Maskierung keinen SPE, die temporal untersuchten aber immerhin eine Tendenz zum SPE zeigten. Betrachten wir dazu die psychophysische Entdeckungsleistung, so findet sich in der Gruppe nasal Untersuchter eine 20%-Punkte und in der Gruppe temporal Untersuchter eine 23%-Punkte höhere *Treffer*- als *Falsch-Alarm*-Rate; ein kleiner, nicht-signifikanter Unterschied zugunsten der temporalen Netzhauthälfte deutet sich also immerhin an. Allerdings zeigt er in die entgegengesetzte Richtung: Nach WALKER et al. (2000) hätten sich die nasal den temporal untersuchten Probanden gegenüber überlegen zeigen müssen. Problematisch ist der Vergleich mit dieser Studie aber insofern, als dass bei WALKER et al. (2002) Sakkadenlatenzen, hier aber 2-AFC- und pupillometrische Daten herangezogen wurden, die zumindest teilweise von anderen neuronalen Strukturen vermittelt werden als Blickbewegungen. Die Studie, die unserem Versuch am nächsten kommt, ist die Einzelfall-Studie von DODDS und Kollegen (2002, dichte Hemianopie rechts), die in einem 2-AFC-Verfahren nur bei nasaler, nicht aber bei temporaler Retina-Stimulation ein signifikantes Ergebnis ermittelten. In diesem Zusammenhang sind die Daten von HK interessant, die ebenfalls der *nasalen* Retinahälfte eine bessere Entdeckungsleistung zuschreiben als der *temporalen* (vgl. Dodds et al., 2002). Da sich bei HK pupillometrisch jedoch kein Vorteil ergeben hat, würde dieser Befund eher dafür sprechen, dass die Entdeckung von Reizen und die Pupillenerweiterung (SPE) ([1] und [3] in Abb. 54) neuronal *unterschiedlich* vermittelt werden. Dass hier ausgerechnet die psycho*physische* der psycho*physiologischen* Methode

überlegen ist, muss verwundern, denn – wie in der Einleitung dieser Arbeit besprochen – wird der physiologischen Komponente häufig eine größere Sensitivität für implizite Prozesse zugeschrieben. Die Ergebnisse von HK und die der Vp von Dodds und Kollegen passen allerdings nicht zu dem naso-temporalen Befund der hier untersuchten *normalsichtigen* Probanden (kein Unterschied bei der 2-AFC-Entdeckungsleistung), so dass die psychophysischen und insbesondere die pupillometrischen Reaktionen von HK – wie auch seine Ergebnisse in Experiment A1 (beste Entdeckungsleistung; als einziger keinen signifikanten SPE in der 80%-Bedingung) - aus dem Rahmen fallen.

Auch die SPE-Befunde der normalsichtigen Probanden (Exp. B1, B2) unter maskierten und (vermutlich) reduzierten Bedingungen zeigten einen nur geringen bis fehlenden SPE. Gibt es hier einen Zusammenhang? Ich meine, dass möglicherweise die *reduzierte* Reiz-Abbildung eine Rolle spielen könnte, und zwar dergestalt, dass bei schwellennahen bis leicht überschwelligen Reizen der Effekt eines schiefen Stimulusverhältnisses (SPE) überlagert werden könnte von Prozessen, die mit (schwellennaher) Wahrnehmung und mentalen Prozessen (Kognitionen, evt. Emotionen) einhergehen könnten. Dieses Phänomen ist in der Blindseh-Forschung nicht unbekannt: So ist z.B. von dem Patienten D.B. (zuerst beschriebener Patient, der stationäre Stimuli überzufällig diskriminieren konnte, siehe Einleitung) bekannt, dass er in Experimenten, in denen er absolut keine Empfindung hatte, besser abschnitt als in Experimenten, in denen er - ähnlich wie HK in den hier beschriebenen Experimenten – stellenweise ein leichtes Empfinden für stimulus on- bzw. offset beschrieb (kein Sehen, nur das Gefühl, dass sich irgendetwas für Bruchteile einer Sekunde verändert hat). Darum war in Experimenten mit D.B. der Reiz immer von so geringer Intensität, dass der Patient in keinster Weise eine Empfindung erfuhr (vgl. Sahraie et al., 2001). Ohne nun direkte Evidenzen aufzeigen zu können, wäre es meines Erachtens möglich, dass das neuronale System, das für visuelle Bewusstheit verantwortlich ist, bei schwellennaher Stimulation bzw. reduzierter Reiz-Abbildung der Ausbildung eines SPE entgegenwirkt. In einem solchen Falle wäre die Psychophysik sensitiver einfach aus dem Grunde, weil das System zur Bewusstheit kognitive und andere mentale Prozesse herausfordert, die Pupilleneffekte beeinflussen. Wenn jedoch eine deutlich überschwellige Reizdarbietung stattfindet – z.B. weil der Reiz im gesunden Feld oder unmaskiert erscheint – werden mentale Prozesse vermutlich weniger stark in den SPE eingreifen, da solche Aufgaben mit vergleichsweise geringem kognitiven Aufwand zu meistern sind. Ein Rückblick auf Tabelle 23 lässt überblicksweise erkennen, dass bei reduzierter Reiz-Abbildung in fast allen Experimenten (Ausnahme: B2) kein signifikanter SPE entstand. Denkbar wäre hier eine

kurvilinearer (U-förmiger) Zusammenhang zwischen der Höhe des SPE auf der Ordinate und der Güte der Reizabbildung auf der Abszisse, wobei der Tiefpunkt des Graphen bei einer reduzierten Abbildung erscheinen sollte. Diese Überlegungen müssten allerdings empirisch noch (besser) untermauert werden.

Mit Blick auf die Läsionen der Patienten zeigen sich große Unterschiede: Während MS, HH, und FS eine Läsion schwerpunktmäßig im Temporallappen aufweisen (die deren Sehstrahlung lädiert haben), weisen die übrigen Patienten eher okzipitale Läsionen auf. Läsionen im Temporallappen können prinzipiell eher Projektionen zum Tektum beeinträchtigen, welche für Blindseh-Leistungen u.a. verantwortlich gemacht werden (siehe 2.3.1). Von diesem Gesichtspunkt aus gesehen wäre eine bessere Leistung von okzipitallädierten Patienten zu erwarten. Zwar haben die zwei psychophysisch signifikanten Vpn (HK und DH) tatsächlich okzipitale Läsionen. Wenn dies jedoch die Begründung für deren Leistung sein sollte, dann hätten auch die anderen beiden okzipital-lädierten Patienten (KHE und BF) eine überzufällige Entdeckungsleistung erbringen müssen. Die Frage, ob die überzufällige Leistung dennoch durch den Läsionsort begründet ist (möglicherweise in Kombination mit anderen Faktoren), kann hier nicht geklärt werden.

Das Ausmaß der kortikalen Läsion unterscheidet sich ebenfalls (siehe MR-Aufnahmen im Anhang); zwar ist die Größe der jeweiligen Läsion nicht quantifiziert worden, es scheint jedoch keinen klaren Einfluss auf die pupillometrischen und psychophysischen Daten zu geben.

7.4 Erfassung der visuellen Bewusstheit

In der bisherigen Diskussion (Tab. 23 und Abb. 54 [2]) ist immer wieder die visuelle Bewusstheit angesprochen worden. Ich möchte hier kurz diskutieren, wie diese Form von Bewusstheit überhaupt gemessen werden soll. Generell sind zur Erfassung der visuellen Bewusstheit zwei Wege beschritten worden (vgl. Dienes, 2004): zum einen mit dem Selbsteinschätzungskriterium (guessing criterion) und zum anderem mit dem Null-Korrelations-Kriterium (zero correlation criterion). Nach dem Selbsteinschätzungs-Kriterium haben Vpn *unbewusstes Wissen*, wenn sie Aufgaben überzufällig gelöst haben, *obwohl* sie angeben, dass sie die Reize nicht bewusst wahrgenommen haben. Das Null-Korrelations-Kriterium betrachtet hingegen das Verhältnis von der Sicherheit (confidence) und der Genauigkeit (accuracy) einer Antwort. Hier ist das Wissen *unbewusst*, wenn keine Korrelation dieser beiden Variablen vorliegt.

In dieser Arbeit wurde im Großen und Ganzen das Selbsteinschätzungs-Kriterium angewendet, denn die Rückmeldung der Vp, ob sie einen Reiz gesehen habe, wurde mehr oder weniger zu Beginn und am Ende eines Experimentes bzw. Experimental-Blockes eingeholt. In Exp. B1 erfolgte zusätzlich ein Rating zur Konzentration und subjektiven Leistungseinschätzung, wiederum nach jedem Block. Blindsehforscher, die explizit die visuelle Bewusstheit in jedem Trial erfassen wollen, wenden das Null-Korrelations-Kriterium an: Dieses Kriterium ist strenger, kann aber nur über eine zusätzliche Frage im Trialablauf erfasst werden: Erst müssen die Patienten sich bei einem Rateverfahren (z.B. 2-AFC) für eine Antwort entscheiden, und diese gegebene Antwort wird dann erneut mit einer „Sicherheitsangabe" versehen. Dieses Maß ist für die visuelle Bewusstheit deswegen besser geeignet (als die Differenz von *Treffer*- und *Falsch-Alarm*-Rate), weil das letztere Ergebnis prinzipiell auch bei völligem Fehlen von visueller Bewusstheit signifikant ausfallen kann. PERENIN's hemianope Patienten (1991) z.B. konnten trotz fehlender Bewusstheit die Bewegungsrichtung großer Flussfelder auf einem hohen Niveau diskriminieren, die Affen von COWEY & STOERIG (1995) ebenso wie Patient HK (Stoerig et al., 2002) zeigten in einer Lokalisationsaufgabe ähnlich hohe Leistungen, obwohl sie keine bewusste Entdeckung angaben (Cowey & Stoerig, 1995). Auch in Experimenten mit Normalsichtigen unter erschwerten Sehbedingungen wie z.B. der Veränderungs-Blindheit (Change Blindness) liegen Befunde vor, in denen eine Dissoziation von Verhalten und der Selbsteinschätzung vorliegt (z.B. Simons & Levin, 1997). Diese Befunde lassen die Annahme, dass eine hohe psychophysische Leistung immer mit visueller Bewusstheit einhergeht, fragwürdig erscheinen. Leider wäre eine zusätzliche trial-by-trial Befragung (zur Sicherheit der Rateentscheidung) für die pupillometrische Messung nicht sinnvoll gewesen, da diese Angabe immer auch ein (zusätzliches) kognitives Element bedeutet hätte, das die Experimente in die Länge gezogen und Pupillendaten vermutlich zusätzlich verrauscht hätte. In meinen Ausführungen zu normalsichtigen Probanden (Exp. B1, B2) und HK (Exp. A2) ging diese (kritische) Annahme allerdings ein, weil ich diese Daten, wenn auch unter Vorbehalt, als reduzierte Reiz-Abbildung eingruppiert habe: Dass diejenigen Probanden, die im Mittel eine 20 Prozentpunkte höhere *Treffer*- als *Falsch-Alarm*-Rate aufweisen, auch einen höheren Grad an visueller Bewusstheit aufweisen, ist darum nicht sicher.

Darüber hinaus ist bei den sog. *Omega*-Proganden (Exp. B1, B2) kaum zu ermitteln, inwieweit das eher zufällig anmutende Entdeckungsniveau tatsächlich auf eine mangelnde Diskriminationsfähigkeit – begründet in einer mangelnden Wahrnehmung - oder aber auf andere unspezifische Faktoren wie mangelnde Anstrengung oder Aufmerksamkeit

zurückzuführen ist. Wichtig ist jedoch festzuhalten, dass *Omega*-Probanden keine konsistenten Ergebnisse in eine pupillensensitive oder nicht-sensitive Richtung zeigten, so dass die Interpretation deutlich erschwert ist.

7.5 Ist der SPE als psychophysiologisches Maß sinnvoll? (Störvariablen)

Es stellt sich nachfolgend die Frage, ob die späte Messung der Pupillenweite (SPE) tatsächlich ein adäquates psychophysiologisches Instrument darstellt, um implizite Verarbeitungsprozesse aufzudecken. Zum einen lassen widersprüchliche Befunde notwendige Bedingungen vermuten, die vorliegen müssen, um einen SPE hervorzurufen (konkret: SPE bei Patienten nur im Antwortmodus ‚*Target*' und in der Target-80%-Bedingung), zum anderen weisen einige Pupillenergebnisse auf eine geringe Reliabilität hin. So fällt z.B. auf, dass die Pupillendilatation der 50%-igen Stimulusdarbietung (A2, Teil 1) im Mittel nicht auf der Null-Linie, sondern etwas über oder unter ihr liegt. Auch liegt in diesem Teil der Einzelfall-Studie kein monoton wachsender Anstieg des SPE vor: Hier erzeugt beispielsweise die 65%-ige Target-Darbietung einen stärkeren SPE als die 80%-ige. Möglicherweise liegen hier Messfehler bzw. -ungenauigkeiten vor, die dann auch bei anderen untersuchten Verhältnissen auftreten könnten. Auch die Güte der Validität muss diskutiert werden: Von den zahlreichen Faktoren, die prinzipiell Einfluss nehmen können (siehe Punkt 3.4.3), mögen diese Abweichungen auch Ausdruck einer Konfundierung von Daten sein, die aufgrund von nicht erkannten oder (noch) nicht identifizierten Störvariablen entstanden sein mögen. Hinzu kommen schließlich noch andere Störfaktoren, auf die ich im Einzelnen jetzt eingehen möchte.

Zunächst stellt sich die Frage, ob genügend Trials präsentiert wurden, um eine Beurteilung des SPE vornehmen zu können. Um ein gutes Signal-Rausch-Verhältnis zu erzielen, wäre es vermutlich sinnvoller gewesen, mehr Trials zu präsentieren. Anderseits muss - insbesondere bei Patienten – immer auch der Zeitaufwand, der für ein Experiment aufgebracht werden muss, mitbetrachtet werden: Bei Patienten ist i.d.R. die verfügbare Zeit, die ein Untersucher hat, meist sehr begrenzt, was nicht selten zur Konsequenz hat, dass die Trialanzahl in den jeweiligen Bedingungen zugunsten einer neuen Bedingung reduziert wird, deren Resultat ebenso von großem Interesse wäre (z.B. zusätzliche Variation in der UV). Bedenklich ist eine Trial-Reduktion deswegen, weil dadurch die Wahrscheinlichkeit für einen Fehler 2. Art ansteigt, was wegen der erhöhten Rauschgefahr auch bei den hier vorliegenden Befunden vorliegen kann. Aus jetziger Sicht würde ich – auch in Anbetracht der vielen potenziellen

Störvariablen - die Trialanzahl deutlich erhöhen, um die Signal-Seite, die vermutlich schwächer als erwartet ist, zu stärken.

Aber nicht allein die Trialanzahl mag für ein Ausbleiben des SPE verantwortlich sein: Ein ebenfalls bedenkenswerter Punkt stellt das Zeitfenster dar, das für die Erfassung des SPE gewählt wurde: In Ermangelung an Wissen über den Grund von vereinzelt und inkonsistent auftretenden frühen Pupillenreaktionen, hatte ich späte Pupillenantworten (SPE) zu validieren versucht, indem nur der *unmittelbare* Zuwachs der Pupillengröße berechnet wurde. Um ein vergleichbar solides Datenfundament zu schaffen, wurde sowohl für das SPE- als auch das vorherige Zeitfenster eine Spanne von 400 ms gewählt. Aus Gründen der Vergleichbarkeit mussten alle anderen Pupillenreaktionen – also auch diejenigen, in deren Trials keine frühen Reaktionen zu beobachten waren – auf die gleiche Art und Weise verrechnet werden. Diese Rechenoperation hat möglicherweise einen negativen Effekt gehabt: Denkbar wäre, dass in dem definierten pre-SPE-Zeitfenster (351-750 ms) Pupillenreaktionen eingingen, die de facto zum SPE gerechnet werden müssten. Der „Schaden" wäre gleich doppelt einzustufen, denn diese Dilatationen gingen dann nicht nur für das entscheidende SPE-Zeitfenster (751-1150 ms) verloren, sondern würden die Differenz in entgegengesetzter Richtung beeinflussen. Ein vorhandener, aber im Trial früh auftretender SPE würde somit nicht entdeckt werden bzw. einen negativen SPE begünstigen. Dass diese Störvariable allerdings eine nicht zu große Rolle spielen kann, zeigt sich meines Erachtens darin, dass trotzdem sechs von sieben Patienten einen SPE zeigten.

Ein weiterer Aspekt ist die Auswahl der *normalsichtigen* Probanden. Da es sich hierbei häufig um Studierende der Psychologie handelte, kann und sollte deren repräsentativen Charakter hinterfragt werden: Dass diese Vpn dennoch rekrutiert wurden, liegt zum einen daran, dass es sich einerseits primär um eine psycho*physiologische* Fragestellung (SPE) handelte und andererseits um einen Leistungsaspekt (Diskrimination bzw. Entdeckung). Beide Aspekte sind selbst mit fachkundigem Hintergrundwissen (z.B. Methodenlehre o.Ä.) nicht oder nur wenig beeinflussbar. Nach meinem Kenntnisstand ist das Pupillenverhalten - auch im Verhältnis zur Entdeckungs- bzw. Diskriminationsleistung - *unabhängig* von der beruflichen Tätigkeit oder dem Wissensstand des Probanden. Auf dieser Annahme beruhend meine ich die Auswahl der Vpn rechtfertigen zu können. Eine andere Frage ist, in wie weit die Studierenden auch mit einer angemessenen Grundhaltung die jeweiligen Aufgaben bearbeitet haben: Hier ist eine besondere Gewissenhaftigkeit und Motivation ebenso vorstellbar (jeder Studierende ist auch mit eigenen Experimenten betraut) wie eine Nachlässigkeit nach dem Motto: „Nicht schon wieder ein Experiment". Vom subjektiven Empfinden her würde ich eher

die letztere Variante annehmen, falls überhaupt. Ob sich jedoch solche unspezifischen Faktoren wie ablehnende Einstellung, mangelnde Motivation oder herabgesetzte Konzentration auf eine mögliche Regelhaftigkeit zwischen 2-AFC und SPE-Daten auswirken kann, ist eine offene Frage.

Ferner erscheint es in den Experimenten B1 und B2 problematisch, dass der Co-Versuchsleiter häufig wechselte: Diesen Einfluss schätze ich allerdings als eher gering ein, da die Instruktion des Experimentes schriftlich erfolgte und ich zu jedem Zeitpunkt der Instruktion zugegen war. Dies gewährleistete ein vergleichbares Vorgehen und stellte sicher, dass jede Vp weitestgehend die gleiche Information auf dem gleichen Wege erhielt.

Weiterhin problematisch ist die zeitliche Diskrepanz, mit der z.B. die naso-temporale Asymmetrie bei HK untersucht wurde. Sowohl die etwas geringere (aber immer noch hohe) Entdeckungsleistung als auch der häufig fehlende SPE könnte ebenso durch die Verzögerung der Datensammlung bedingt sein (z.B. jahreszeitliche Schwankungen). Die nicht signifikanten Unterschiede von den *Alpha*- und *Omega*- Probanden (B1) stellen vielleicht auch das Resultat von einer beidseitigen Stimulation, zumal mit starken Luminanzveränderungen dar (Maske), die in diesem Experiment vorlagen (vergleiche Punkt 6.1.8 Diskussion B1).

Insgesamt gesehen stützen die Befunde aber die Annahme, dass späte pupillometrische Effekte (SPE) mit der psychophysischen Entdeckungsleistung einen kurvilinearen Zusammenhang bilden. Dies wurde jedoch nicht für *frühe* Pupillenantworten, die reizspezifisch z.B. bei Luminanz- oder Ortsfrequenzveränderungen auftreten, beschrieben; dabei scheint ein linearer Zusammenhang der beiden Parameter vorzuliegen.

Mit Blick auf den SPE muss deswegen festgehalten werden, dass dieser Effekt *auch* auftreten kann, wenn psychophysisch kein Nachweis zu ermitteln ist (Exp. A1). Die pupillometrische Erfassung des SPE hat – als Nachweis impliziter Informationsverarbeitungsprozesse - bei Vorliegen von bereits *positiven* psychophysischen Resultaten nur begrenzten Aussagewert, denn im Falle einer reduzierten Abbildung erscheint der SPE schwach bis fehlend, und im Falle einer bewussten Abbildung ist er wenig erkenntnisbringend. Im Falle einer vollständig fehlenden Reiz-Abbildung erscheint der SPE allerdings besonders informativ, weil der Untersucher mit ihm ein sensitives Maß zur Erfassung der Blindseh-Fähigkeit zur Verfügung hat. Da nun (vermutlich) ein kurvilinearer Zusammenhang bei den späten und ein linearer bei den frühen Pupillenreaktionen vorliegt, sollten die späten Pupillen-Antworten auch nicht als „*nonverbale*“ und „*kriteriumsfreie Antwort*“ angesehen werden (vergleiche 3.4.2).

7.6 Anwendung und Ausblick

Da die Durchführung von pupillometrischen Experimenten vergleichsweise personal- und kostengünstig ist, sollte sie in Anbetracht des diagnostischen Gewinnes (Informationsverarbeitung im blinden Feld? Ja oder Nein!) und den daraus resultierenden Konsequenzen (Gesichtsfeld-Restitutionstraining: Sinnvoll oder nicht sinnvoll?) unbedingt weiter verfolgt werden. Insbesondere die Aufzeichnung und Auswertung von späten Pupillenreaktionen (SPE) erscheinen mir – mit Blick auf eine erhöhte Sensitivität - erfolgsversprechender zu sein als die vergleichsweise frühen Antworten. Dass psychosensorische Pupillenreaktionen in ihrem Effekt eher gering sind (Beatty, 1986), verschlechtert zwar das Signal-Rausch-Verhältnis, erlaubt aber die Verwendung sehr schwacher Reizintensitäten.

Das Ziel, eine kosten- und personalgünstige psychophysiologische Methode zur Erfassung des Blindsehpotenzials zu entwickeln, ist meines Erachtens erreicht worden: Zwar sollte der experimentelle Umfang (z.B. Trial-Anzahl) erhöht werden, andererseits besteht aufgrund der vorliegenden Daten die begründete Aussicht, dass unter bestimmten Bedingungen der SPE sensitiver ist als das 2-AFC-Verfahren. Die Bedingungen selber waren zum einen ‚*Target'*-Antworten, dessen Effekt möglicherweise auf eine „Inkongruenz" zwischen visueller Wahrnehmung und gegebener Antwort beruhte, und zum anderen die Notwendigkeit einer *häufigen* Target-Darbietung (Target 80%). Wenn nun diese Bedingungen – aus welchen Gründen auch immer sie wirksam sein mögen – angewendet würden, könnte bei rindenblinden Patienten, deren psychophysische Ergebnisse auf Rateniveau liegen, in einem nur zweistündigen Experiment über die Pupillendaten (SPE) erfasst werden, ob zumindest auf diesem Niveau eine Reizverarbeitung erfolgt ist. Bei sechs von sieben der hier untersuchten Patienten war dies der Fall.

Der große Vorteil der Pupillometrie gegenüber anderen psychophysiologischen Messverfahren ist zudem die Kombination einer relativ hohen Abtastrate (50-350Hz), des geringen Aufwandes in der Vorbereitung (kein Kleben von Elektroden etc.), der nahezu unbemerkten Aufnahme von Daten (zumindest für das Pupillenmess-System, das hier verwendet wurde) und der relativ schnellen Auswertung der digital aufgenommenen Daten.

Die Frage, ob rindenblinde Patienten Blindseh-Potenzial haben, sollte deswegen nicht allein auf der Basis von psychophysischen Daten entschieden werden: Die technischen Möglichkeiten, d.h. pupillometrischen Messgeräte liegen ja vor, nun müssen sie (nur noch) angewendet werden.

8.0 Literatur

Adams, R.D. & Victor, M. (1981). *Principles of neurology*. (2nd edition). New York: McGraw-Hill.

Alexandridis, E., Krastel, H. & Reuther, R. (1979). Pupillenreflexstörungen bei Läsionen der oberen Sehbahn. *Albrecht von Graefes Archiv der Klinischen und Experimentellen Ophthalmologie*, 177, 136-151.

Barbur, J. (2004). Learning from the pupil. Studies of basic mechanisms and clinical application. In: Chalupa, L.M. & Werner, J.S.: *The Visual Neurosciences*. Bradford Book.

Beatty, J. (1982). Task-evoked pupillary responses, processing load, and the structure of processing recources. *Psychological Bulletin*, 91, 2, 276-292.

Beatty, J. (1986). The Pupillary System. Cole, M.G.H., Donchin, E., & Porges, S.W. (Hrsg.) In: *Psychophysiology. Systems, Processes, and Applications.* Guilford Press: New York.

Beatty, J. & Kahneman, D. (1966). Pupillary Changes in two Memory Tasks. *Psychonomic Science*, 5, 371-372.

Beatty, J. & Lucero-Wagoner. (2000). The Pupillary System. In: *Handbook of Psychology*; 2nd edition; 6. Kapitel. Hrsg.: Cacciopo, J.T.; Tassinary, L.G., & Berntson, G.G., Cambridge University Press.

Bender, M.B. & Krieger, H.P. (1951). Visual function in perimetrically blind fields. *Archive of Neurology and Psychiatry,*65, 2-79.

Bernard, C. (1852). Experiences sur les fonctions de la portion cephalique du grand sympathique. *Comptes Rendus des Seances de la Societe de Biologie et de Ses Filiales*, 4, 155, 168-170.

Biederman, I. & Zachary, R.A. (1970). Stimulus versus response probability effects in choice reaction time. *Perception and Psychophysics*, 7, 189-192.

Boersma, F., Wilton, K., Barham, R. & Muir, W. (1979). Effects of arithmetic problem difficulty on pupillary dilation in normals and educable retardates. *Journal of Experimental Child Psychology*, 9, 142-155.

Bonvallet, M., & Zbrozyna, A. (1963). Les commandes rèticulaires du système autonome et en particulier de l'innervation sympathique et parasympathique de la pupille. *Archives of Italian Biology*, 101, 174-207.

Bortz, J. & Lienert, G.A. (1998). *Kurzgefasste Statistik für die klinische Forschung*. Springer: Berlin, Heidelberg.

Bouma, H. (1962). Size of the static pupil as a function of wavelength and luminosity of the human eye. *Nature*, 193, 690-691.

Bradshaw, J.L. (1970). Pupilsize and Drug State in a Reaction Time Task. *Psychonomic Science*, 18, 112-113.

Breen, L.A., Burde, R.M, & Loewy, A.D. (1983). Brainstem connections to the Edinger-Westphal nucleus of the rat: a retrograde tracer study. *Brain Research*, 261, 303-306.

Breitmeyer, B. G. & Ogmen, H. (2000). Recent Models and Findings in Backward Visual Masking: A Comparison, Review, and Update". *Perception & Psychophysics*, 62, 1572-1595.

Bridgeman, P. & Staggs, D. (1982). Plasticity in human blindsight. *Vision Research*, 22, 1199-1203.

Brindley, G.S. Gautier-Smith, P.C., & Lewin, W. (1969). Cortical blindness and the functions of the non-geniculate fibres of the optic tracts. *J Neurol Neurosurg Psychiatry*; 32; 259-264.

Büchel, C., Josephs, O., Rees, G., Turner, R., Frith, C.D., & Friston, K.J. (1998). The functional anatomy of attention to visual motion. A functional MRI study. *Brain*, 121, 1281-1294.

Budge, J. & Waller, A. (1851). Recherches sur le systeme nervaux. 1iere partie. Action de la partie cervicale du nerf grand sympathique et d'une portion de la moelle epiniere sur la dilatation de la pupillae. *Comptes Rendus Hebdomadaires des Seances de l'Academie des Sciences* ; D : Sciences Naturelles, 33, 370-374.

Bullier, J., Girard, P., & Salin, P.-A. (1994). The role of area 17 in the transfer of information to extrastriate visual cortex. Peters, A. & Rockland K.S. (Hrsg). In: *Primary Visual Cortex in Primates*, 301-330. Plenum. New York.

Bumke, O. (1903). Beitrage zur Kenntnis der Irisbewegungen. *Zentralblatt für Nervenheilkunde und Psychiatrie*, 673-680.

Bumke, O. (1904). *Die Pupillenstörungen bei Geistes- und Nervenkrankheiten. Physiologie und Pathologie der Irisbewegungen*. Fischer; Jena.

Campion, J., Latto, R., Smith, Y.M. (1983). Is blindsight an effect of scattered light, spared cortex, and near-threshold vision? *Behavioral and Brain Science*, 6, 423-486.

Carrasco, M., Ling, S., & Read, S. (2004). Attention alters appearance. *Nature Neuroscience*; 7, 308-313.

Cibis, G.W., Campos, E.C. & Aulhorn, E. (1975). Pupillary hemiakinesia in supragenicular lesions. *Archives of Ophthalmology*, 93, 1322-1327.

Collins, V.J. (1966). *Principles of anaesthesiology*. Philadelphia: Lea & Febiger.

Cowey, A. Stoerig, P. (1989). Projection patterns of surviving neurons in the dorsal lateral geniculate nucleus following discrete lesions of striate cortex: implications for residual vision. *Experimental Brain Research*, 1989, 75, 631-638.

Cowey, A., Stoerig, P., & Bannister, M. (1994). Retinal ganglien cells labelled from the pulvinar nucleus in macaque monkeys. *Neuroscience*, 61, 691-705.

Cowey, A., Stoerig, P., & Perry, V.H. (1989). Transneuronal retrograde degeneration of retinal ganglien cells after damage to striate cortex in macaque monkeys: selective loss of Pß cells. *Neuroscience*, 29, 65-80.

Czeisler, C.A., Shanahan, T.L., Klerman, E.B., Martens, H., Brotman, D.J., Emens, J.S., Klein, T., Rizzo, J.F. 3rd. (1995). Suppression of melatonin secretion in some blind patients by exposure to bright light. *New England Journal of Medicine,* 322, 6-11.

Damsky, H. (1965). *Versuche über Pupillenreaktionen auf kurze Schallreize*. Dissertation der Medizinischen Akademie in Düsseldorf. Universitätsbibliothek Düsseldorf.

Darwin, C. (1872). *The expression of emotion in man and animals*. London: Murray.

Davidson, R.J. & Tomarken, A.J. (1989). Laterality and emotion: An electrophysiological approach. In: Boller, F. & Grafman, J. (Hrsg.): *Handbook of Neuropsychology*. Amsterdam: Elsevier.

De Launey, J. (1949). A note on the photo-pupil reflex. *Journal of the Optical Society of America*, 39, 364-367.

Dineen, J., Hendrickson, A., & Keating, E. G. (1982). Alterations of retinal inputs following striate cortex removal in adult monkey. *Experimental Brain Research,* 47, 338-345.

Dorsch, F. (1984). *Dorsch Psychologisches Wörterbuch*. 12.Auflage. Bern; Göttingen; Toronto; Huber-Verlag.

Duus, P. (2001). *Neurologisch-topische Diagnostik*. 7. Auflage. Thieme: Stuttgart

Edwards, S.B., & de Olmos, J.S. (1976). Autoradiographic studies of the projections of the midbrain reticular formation: ascending projections of nucleus cuneiformis. *Journal of Comparative Neurology*; 15;165, 417-431.

Eysel, U. (1996). Sehsystem. (Kap.23); Klinke, R. & Silbernagel, S. (Hrsg.). In: *Lehrbuch der Physiologie.* Thieme-Verlag: Stuttgart, New York.

Friedman, D., Hakarem, G., Sutton, S., & Fleiss, J.L. (1973). Effect of stimulus uncertainty on the papillary dilation response and the vertex evoked potential. *Electoencephalography & Clinical Neurophysiology*, 34, 475-484.

Frydrychowicz & Harms, H. (1940). Ergebnisse pupillometrischer Untersuchungen bei Gesunden und Kranken. *Verhandlungen der Deutschen Ophthalmologischen Gesellschaft*, 53, 71-80.

Graybiel, A.M. (1977). Direct and indirect preoculomotor pathways of the brainstem: an autoradiographic study of the pontine reticular formation in the cat. *Journal of Comparative Neurology,* 1, 175 (1): 37-78.

Green, D.M.; & Swets, J.A. (1974). *Signal detection theory and psychophysics*. New York: Robert E. Krieger Publishing Company.

Grünberger, J. (2004). *Pupillometrie in der klinisch-psychophysiologischen Diagnostik.* Springer-Verlag: Wien, New York.

Grünberger, J., Linzmayer, L., Grünberger, M. & Saletu, B. (1992). Pupillometry in Clinical Psychophysiological Diagnostics: Methodology and Proposals for Application in Psychiatry. *Israel Journal of Psychiatry and Related Sciences*, 29, 100-113.

Grünberger, J., Lesch, O.M. & Linzmayer, L. (1988). Bestimmung von vier Alkoholiker-Typen mit Hilfe der statistischen und lichtevozierten dynamischen Pupillometrie. Wiener *Zeitschrift für Suchtforschung*, 11(4), 29-34.

Grünberger, J., Linzmayer, L., Fodor, G., Presslich, O., Praitner, M. & Loimer, N. (1990). Static and Dynamic Pupillometry for Determination of the Course of Gradual Detoxification of Opiate-addicted Patients. *European Archives of Psychiatry and Clinical Neuroscience*, 240, 109-112.

Hakarem, G. & Lidsky, A. (1975). Characteristics of pupillary reactivity in psychiatric patients and normal controls. In: *Experiemental Approaches to Psychophathology*. Ed. Kietzman, M.L, Sutton, S., and Zubin, J., 61-72. Acadamic Press. New York.

Hakarem, G., & Sutton, S. (1966). Pupillary response at visual threshold. *Nature*, 212, 485-486.

Harms, H. (1951). Hemianopische Pupillenstarre. *Klinisches Monatsblatt der Augenheilkunde*, 118, 133-147.

Hausmann, M. & Güntürkün, O. (2000). Steroid fluctuations modify functional cerebral asymmetries: the hypothesis of progestorone-mediated interhemispheric decoupling. *Neuorpychologia*, 38, 1362-1374.

Heilman, K., Watson, R., & Valenstein, E.J. (1993). Neglect and Related Disorders. In: *Clinical Neuropsychology*. Hrsg: Heilman, K. & Valenstein, E.; New York: Oxford University Press.

Heinrich, W. (1896). Die Aufmerksamkeit und Funktion der Sinnesorgane. *Zeitschrift für Psychologie und Physiologie der Sinnesorgane*, 9, 342-388.

Hess, E.H. (1965). Attitude and Pupil Size. *Scientific American*, 4, 46-54.

Hess, E.H. (1972). Pupillometrics: A Method of Studying Mental, Emotional, and Sensory Process. In Greenfield & Sternbach (Eds). *Handbook of Psychophysiology,* 491-531. New York: Holt, Rinehart and Winston INC.

Hess, E.H. & Polt, J.M. (1960). Pupil Size in Relation to Interest Value of Visual Stimuli. *Science*, 132, 349-350.

Hess, E.H., Seltzer, A.L. & Shlien, J.M. (1965). Pupil Response of Hetero- and Homosexual Males to Pictures of Men and Women. *Journal of Abnormal Psychology*, 70, 165-168.

Hobson, J.A. & Brazier, M.A.B. *The reticular formation revisited: Specifying function for a nonspecific system*. New York: Raven Press.

Holmes, G. (1918). Disturbances of vision by cerebral lesions. *British Journal of Ophthalmology,* 2, 353–384.

Humphrey, G.K. (1974). Vision in a monkey without striate cortex: a case study. *Perception*, 3, 241-255.

Ishigaki,H., Miyao, M. & Ishihara, S. (1991). Change of Pupil Size as a Function of Exercise. *Journal of Human Ergology*, 20, 61-66.

Itaya, S.K. & Van Hoesen, G.W. (1983). Retinal axons to the medial terminal nucleus of the accessory optic system in old world monkeys.*Brain Research*, 269, 223–230.

Janisse, M.-P. (1974). Pupil size, affect and frequency of exposure. *Social Behavior and Personality*, 2, 125-146.

Janisse, M.-P. (1977). *Pupillometry: The Psychology of the Pupillary Response*. Hemisphere Publishing Co. Washington, D.C.

Kahneman, D. (1973). *Attention and Effort*. Englewood Cliffs, N.J.:Prentice Hall.

Kahneman, D. & Beatty, J. (1966). Pupildiameter and Load on Memory. *Science*, 154, 1583-1585.

Kahneman, D., Peavler, W.S. & Onuska, L. (1968). Effects of Verbalisation and Incentive on the Pupil Response to Mental Activity. *Canadian Journal of Psychology*, 22, 186-198.

Kardon, R.H. & Mooren, P. (1995). *Comparison of pupil diameter and visual perimetry in patients with visual loss: Update and New Direction*. Vortrag auf 21st Pupil Colloquium (Schloss Haigerloch)

Kerkhoff, G., Münßinger, U., Haaf, E., Eberle-Strauss, G. & Stögerer, E. (1992). Rehabilitation of homonymeous scotoma in patients with postgeniculate damage of the visual system: saccadic compensation training. *Restorative Neurology and Neuroscience*, 4, 245-254.

Kinsbourne, M. (1993). Orientational Bias Model of Unilateral Neglect: Evidence from Attentional Gradients Within Hemispace. In: *Unilateral Neglect: Clinical and Experimental Studies*. Hrsg: Robertson, I.J. & Marshall, J.C.; Hillsdale, NJ: Erlbaum.

Klüver, H. (1936). An analysis of the effects of the removal of the occipital lobes in monkeys. *Journal of Psychology,* 2, 49-61.

Klüver, H. (1949). Visual functions after removal of the occipital lobes. *Journal of Psychology*, 11, 23-45.

Kolb, B. & Wishaw, I.Q. (1996). *Neuropsychologie*. Spektrum Verlag: Heidelberg.

Koss, M.C. & Wang, S.C. (1972). Brainstorm loci for sympathetic activation of the nictitating membrane an pupil of the cat. *American Journal of Physiology*, 224, 900-905.

Koss, M.C., Cherezghiler, T., & Nomura, A. (1984). A CNS adrenergic inhibition of paraysmpathetic oculomotor tone. *Journal of Autonomic Nervous System*, 10, 55-68.

Kramer, A.F. (1991). Physiological Metrics of Mental Workload: A Review of Recent Progress. In Damos, D.L. (Hrsg.). *Multiple Task Performance*, 279-328, London: Taylor & Francis.

Kumnik, L.S. (1954). Pupillary psychosensory restitution and aging. *Journal of the Optical Society of America*, 44, 735-741.

La Berge, D., & Tweedy, J.R. (1964). Presentation probability and choice time. *Journal of Experimental Psychology*, 68, 477-481.

La Berge, D., Legrand, R., & Hobbie, R.K.(1969). Functional identification of perceptual and response biases in choice reaction time. *Journal of Experimental Psychology*, 79, 295-299.

Loewenfeld, I. E. (1958). Mechanisms of reflex dilation of the pupil. *Documenta. Ophthalmo*logica, 12, 185-448.

Loewenfeld, I. E. (1966). Pupillary movements associated with light and near vision. An experimental review of the literature. *Natl. Acad. Sci. N.R.C. Publ.*, 1272, 17-105.

Loewenfeld, I. E. (1973). Supra-spinale Hemmung. Mechanismus und geschichtliche Entwicklung. In: *Die normale und die gestörte Pupillenbewegung*. Symposium der Deutschen Ophthalmologischen Gesellschaft vom 10.-12. März 1972 in Bad Nauheim; Hrsg: Dodt, E., Schrader, K.E., Verlag J.F. Bergmann: München.

Loewy, A.D., Aranjo, J.C., & Kerr, W.L. (1973). Pupillodilator pathways in the brain stem of the cat : anatomical and electrophysiological identification of a central autonomic pathway. *Brain Research*, 60, 65-91.

Lowenstein, O. & Loewenfeld, I.E. (1964). The sleep-waking cycle and pupillary activity. *Annuals of the New York Academy of Science*, 117, 142-156.

Lowenstein, O. & Loewenfeld, I.E. (1969). The pupil. In: Davson, H. (Hrsg.): *The eye*. Vol. 3, Muscular mechanisms, New York: Academic Press, 255-337.

Magoun, H.W. & Ranson, S.W. (1935). The central path of the light reflex. *Archives of Ophthalmology*, 13, 791-811.

Marzi, C. A., Tassinari, G., Aglioti, S., & Lutzemberger, L. (1986). Spatial summation across the vertical meridian in hemianopics: A test of blindsight. *Neuropsychologia*, 24, 749–758.

Mihailovic LT, Cupic D, Dekleva N. (1971). Changes in the numbers of neurons and glial cells in the lateral geniculate nucleus of the monkey during retrograde cell degeneration; *Journal of Comparative Neurology*, 142, 223-229.

Millner, A.D. & Goodale, M.A. (1993). Visual pathways to perception and action. *Progress in Brain Research*, 95, 317-337.

Miyao, M., Ishihara, S., Sakakibara, H., Kondo, T., Yamada, S., Furuta, M., Yamanaka, K., Yasuma, T., Yamanaka, K., Yasuma, T., Toda, Y. (1991). Effects of colour CRT-Display on pupil size in colour-blind subjects. *Journal of Human Ergology*, 20, 241-247.

Mohler, C.W. & Wurtz, R.H. (1977). Role of striate cortex and superior colliculus in visual guidance of saccadic eye movements in monkeys. *Journal of Neurophysiol*ogy, 40, 74-94.

Morris, J.S., DeGelder, B., Weiskrantz, L., Dolan, R.J. (2001). Differential extrageniculostriate and amygdala responses to presentation of emotional faces in a cortically blind field. *Brain*; 124, 1241-1252.

Moruzzi, G. (1972). The sleep-waking cycle. Reviews of physiology: *Biochemistry and experimental pharmacology*. New York: Springer-Verlag. Niida, T., Mukuno, K., Ishikawa, S., & Iwai, E. (1990). Transneuronal retrograde degeneration in adult monkey retina following ablation the striate cortex. Iwai, E. & Mishkin, M. (Hrsg.). In: *Vision, memory, and the temporal lobe*. New York; Elsevier.

Mylius, V. (2002). *Pupillenveränderungen bei Migräne*. Dissertation: Medizin, Philipps-Universität Marburg.

Neumann, O. & Klotz, W. (1994). Motor responses to nonreportable, masked stimuli: Where is the limit of direct parameter specification? In Moscovitch, M. & Umiltà, C. (Hrsg): *Attention & Perfomance XV. Conscious and nonconscious information processing*. Cambridge, MA: MIT Press.

Nunnaly, J.C., Knott, P.D., Duchnowski, A. & Parker, R. (1967). Pupillary Response as a General Measure of Activation. *Perception and Psychophysics*, 2, 149-155.

Oldfield, R.C., 1971. The assessment and analysis of handedness: the Edinburgh inventory. *Neuropsychologia* 9, 97– 113.

Papakostopoulos, D.K., Dean Hart, J.C. & Carrall, R. (1991). Comparison of Pupillometry, Electroretinography, and Pattern Visual Evoked Potentials in Diabetics with and without Retinopathy. *Journal of Psychophysiology*, 5, 249-250.

Pasik, P. & Pasik, T. (1965). Visual behavior of monkeys with occipital lobe lesions. In: *Disturbances of the occipital lobes*. Proceedings VIII. International Congress of Neurology; 3; 127-130.

Pasik, P. & Pasik, T. (1982). Visual Functions in Monkeys after Total Removal of Visual Cerebral Cortex. *Contribution to Sensory Physiology*, 7, 147-200.

Perry, V.H. & Cowey, A. (1984). Retinal ganglien cells that project to the superior colliculus and pretectum in the macaque monkey. *Neuroscience*, 12, 1125-1137.

Posner, M..I. (1980). Orienting of attention. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology A*, 32, 3-25.

Pöppel, E., Held, R., & Frost, D. (1973). Residual visual function after brain wounds involving the central visual pathways in man. *Nature*, 243, 295-296.

Qiyuan, J., Richer, F., Wagoner, B.L., & Beatty, J. (1985). The pupil and stimulus probability. *Psychophysiology*, 22, 530-534.

Rafal, R. Smith, J. Krantz, J., Cohen, A. & Brennan C. (1990). Extrageniculate vision in hemianopic humans: saccade inhibition by signals in the blind field. Science, 250, 118-121.

Reinhard, G., & Lachnit, H. (2002). Evidence for the utilization of distinctive features in nonlinear discrimination problems. *Biological Psychology*, 61, 277-292.

Richer, F. & Beatty, J. (1985). Pupillary dilations in movement preparation and execution. *Psychophysiology*, 22, 204-207.

Richer, F., Silverman, C., & Beatty, J. (1983). Response selection and initiation in speeded reactions: a pupillometric analysis. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 9, 360-370.

Riddoch, G. (1917). Dissociation of visual perceptions due to occipital injuries, with especial reference to appreciation of movement. *Brain*, 40,15–57.

Rief, W. & Birbaumer, N. (2000). *Biofeedback-Therapie. Grundlagen, Indikation und praktisches Vorgehen*. Stuttgart: Schattauer Verlagsgesellschaft.

Riggs, L.A. (1965). Visual acuity. In C.H. Graham (Hrsg.). *Vision and visual perception*. New York: John Wiley.

Rodman, H.R., Gross, C.G., & Albright, T.D. (1990). Afferent basis of visual response properties in area MT of macaque. II. Effects of superior colliculus removal. *Journal of Neuroscience,* 10, 1154-1164.

Rubin, L.S. (1961). Patterns of pupillary dilation and constriction in psychotic adults and autistic children. *The Journal of Nervous and Mental Desease*, 133, 130-142.

Sahraie A, Weiskrantz L, Barbur JL, Simmons A, Williams SC, Brammer MJ. (1997). Pattern of neuronal activity associated with conscious and unconscious processing of visual signals. *Proceedings of the National Acadamy of Science of USA*, 94, 9406–9411.

Sahraie, A., Weiskrantz, L., Trevethan, C.T., Cruce, R., & Murray, A.D. (2002). Psychophysical and pupillometric study of spatial channels of visual processing in blindsight. *Experimental Brain Research*, 143, 249-256.

Schiller, P.H, Logothetis, N.K., & Charles, E.R. (1990). Role of the color-opponent and broad-band channels in vision. *Visual Neuroscience*, 5, 321-346.

Sillito, A.M. & Zbrozyna, A.W. (1973). The Neural Control of Pupilloconstrictor Activity. In Dodt, E. & Schrader, K.E. (Hrsg.). *Normal and disturbed pupillary movements*. München: Verlag J.F. Bergmann, 30-35.

Sherman, S.M. (1974). Monocularly deprived cats: improvement of the deprived eye's vision by visual decortication. *Science*; 18; 186, 267-269.

Simons, D.J. & Levin, D.T. (1997). Change Blindness. *Trends in Cognitive Sciences*, 1, 261-269.

Skoglund, C.R. (1943). On the Influence of Alcohol on the Pupillary Light Reflex in Man. *Acta Physiologica Scandinavica*, 6, 94-96.

Slooter, J. & van Norren, D. (1980). Visual acuity measured with pupil responses to checkerboard stimuli. *Investigative Ophthalomology & Visual Science*, 19, 105-108.

Sokolov, E.N. (1960). Neuronal models and the orienting reflex. In M.A.B. Brazier (Ed.). *The central nervous system and behavior.* New York: Josiah Macy Jr. Foundation.

Springer, S.P. & Deutsch, G. (1998). *Linkes/Rechtes Gehirn*. 4.Auflage. Spektrum Verlag: Heidelberg.

Steinhauer, S.R., Hakarem, G. & Spring, B.J. (1979). The pupillary response as a potential indicator of vulnerability to Schizophrenia. *Psychopharmacology Bulletin*, 15, 44-45.

Steinhauer, S.R. & Hakarem, G. (1992). The pupillary response in cognitive psychophysiology and schiziphrenia. In: Friedman, D. & Bruder, G. (Hrsg).

Psychophysiology and Experimental Psychopathology: A Tribute to Samuel Sutton. *Annals of the New York Academy of Sciences*, New York, 658, 182-204.

Stoerig, P. (1987). Chromaticity and achromaticity: evidence for a functional differentiation in visual field defects. *Brain,* 110, 869-886.

Stoerig, P. (2000). Wege zur Gesichtsfeldwiederherstellung. *Zeitschrift für Neuropsychologie*; 11; 91-93.

Stoerig, P. (2001). The Neuroanatomy of Phenomenal Vision: A Psychological Perspective. *Annals New York Academy of Sciences*, 929, 176-194.

Stoerig, P. (2003). Blindsehen. In: *Neuropsychologie*, Hrsg. Karnath, H-O. & Thier, P. Springer-Verlag: Berlin.

Stoerig, P. & Cowey, A. (1997). Blindsight in man and monkey. *Brain,* 120, 535-559.

Stoerig, P., Hübner, M. & Pöppel, E. (1985). Signal detection analysis of residual vision in a field defect due to a post-geniculate lesion. *Neuropsychologia*, 23, 589-599.

Stoerig, P., Zontanou, A., & Cowey, A. (2002). Aware or Unaware Assessment of Cortical Blindness in Four Men and a Monkey. *Cerebral Cortex* 12, 565-574.

Szabadi, E. & Bradshaw, C.M. (1996). Autonomic pharmacology of ά2-adrenoceptors. *Psychopharmacology*, 10, 6-18.

Teuber, H.-L., Battersby, W.S, & Bender M.B. (1960). *Visual Field Defects After Penetrating Missile Wounds*. Cambridge MA; Harvard University Press.

Thompson, H.S. (1947). Binocular summation within the nervous pathways of the pupillary light reflex. *Journal of Physiology*, 106, 59-65.

Torjussen, T. 1976. Residual function in cortically blind hemifields. *Scandinavian Journal of Psychology,* 17, 320-322.

Ungerleider, L. G. & Mishkin, M. (1982). Two cortical visual systems. In: Ingle, D.J., Goodale, M.A., Mansfield, R.J.W. (Hrsg). *Analysis of visual behavior* (S. 549-586) Cambridge, Massachusetts: MIT Press.

Van Buren, J.M. (1963). Trans-synaptic retrograde degeneration in the visual system of primates. *J of Neurology, Neurosurgery and Psychiatry*, 26, 402-409.

Van Buren, J.M. (1963). *The Retinal Ganglion Cell Layer*. Charles Thomas, Springfield, Illinois.

Van der Molen, M.W., Boomsma, D.I., Jennings, J.R., Nieuwboer, R.T (1989). Does the heart know what the eye sees? A cardiac/pupillometric analysis of motor preparation and response execution. *Psychophysiology*, 26, 70-80.

Velden, M. (1982). *Die Signalentdeckungstheorie in der Psychologie*. Kohlhammer Standards Psychologie: Stuttgart.

Verhagen, W.I.M., Huygen, P.L.M., & Mulleners, W.M. (1997). Lack of optokinetic nystagmus and visual motion perception in acquired cortical blindness. *Neuro-Ophthalmology*.

Walker, R., Mannan, S., Maurer, S. et al. (2000). *Proceedings of the. Royal. Society of Lond.on, Series B: Biological Sciences,* 267, 431-438.

Weiskrantz, L. (1980). Varieties of residual experience. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 32, 365-386.

Weiskrantz, L. (1999). *Conscioussness Lost and Found*. 2nd ed. Oxford Unviversity Press.

Weiskrantz, L. (2004). Roots of blindsight. *Progress in Brain Research,*144, 229-241.

Weiskrantz, L. & Cowey, A. (1970). Filling in the scotoma: a study of residual vision after striate cortex lesions in monkeys. Stellar, E. & Sprague, J.M. (Hrsg.) In: *Progress in Physiological Psychology 3*. New York: Academic Press, 97, 709-728.

Weiskrantz, L., Warrington, E.K., Sanders, M.D., & Marshall, J. (1974). Visual capacity in the hemianopic field following a restricted cortical ablation. *Brain,* 97, 709-728.

Weiskrantz, L., Rao, A., Hodinott-Hill, I., & Cowey, A. (2003). Brain potentials associated with conscious aftereffects induced by unseen stimuli in a blindsight subject. *Proceedings of the National Academy of Sciences of USA*, 100, 10500-10505.

Wertheim, T. (1894) Über die indirekte Sehschärfe. *Zeitschrift für Physiologische Sinnesorg* 7, 172-241.

Westphal, A. (1920). Über Pupillenphänomene bei Katatonie, Hysterie und myoklonischen Symptomkomplexen. *Monatszeitschrift für Psychiatrie und Neurologie*, 47, 187-193.

Wilbrand, H. & Sänger, A. (1904). *Die Neurologie des Auges*. Vol. 3. Wiesbaden: J.F. Bergmann.

Wilhelm, H. (1991). *Pupillenreaktionen-Pupillenstörungen*. Köln: Kohlhammer.

Williams, C., Azzopardi, P. & Cowey, A. (1995). Nasal and temporal retinal ganglion cells projecting to the midbrain: implications for "blindsight". *Neuroscience,* 65, 577-586.

Woods, R.L. & Thompson, W.D. (1995). Effects of Exercise on Aspects of Visual Function. *Ophthalmological and Physiological Optics*, 15, 5-12.

Yoss, R.E., Moyer, N.J., Hollenhorst, R.W. (1970). Hippus and other spontaneous rhythmic pupillary waves. *American Journal of Ophthalmology*, 70, 935-941.

Young, R.S.L. & Alpern, M. (1980). Pupil responses to foveal exchange of monochromatic lights. *Journal of the Optical Society of America*, 70, 697-706.

Young, R.S.L., Han, B.C., & Wu, P.Y. (1993). Transient and sustainded components of the pupillary responses evoked by luminance and color. *Vision Research*, 33, 437-446.

Yukie, M. & Iwai, E. (1981).Direct projection from the dorsal lateral geniculate nucleus to the prestriate cortex in macaque monkey. *Journal of Comparative Neurology*, 201, 81-97.

Zihl, J. (1980). ‚Blindsight': Improvement of visually guides eye movements by systematic practice in patients with cerebral blindness. *Neuropsychologia*, 18, 71-77.

Zihl, J. (2002). Zerebrale Blindheit und Gesichtsfeldausfälle. In: Karnath, H.-O. & Thier, P. (Hrsg). *Neuropsychologie.* Springer Verlag: Stuttgart

Zihl, J. & Werth, R. (1984). Contributions to the study of ‚blindsight' II. The role of specific practice for saccadic localization in patients with postgeniculate visual field defects. *Neuropsychologia*, 22, 13-22.

Zihl, J., Tretter, F., Singer, W. (1980). Phasic electrodermal responses after visual stimulation in the cortically blind hemifield. *Behavioral Brain Research*, 1, 197-203.

Zilles, K. & Rehkämper, G. (1994). *Funktionelle Neuroanatomie. Lehrbuch und Atlas*. Springer-Verlag: Berlin Heidelberg New York.

9.0 Anhang

- Fragebogen (Persönliches, Allgemeinbefinden)
- Fragebogen zur Händigkeit
- 2 Instruktionen (Happy vs. Sad)
- 2 Instruktionen (Entdeckungs-Experiment)
- Kernspintomographische Aufnahmen der Patienten

Fragebogen

VP-Initialien:
Geburtsdatum:

Persönliche Daten	
Name (Initialen)	
Geschlecht	
Alter	
Augenfarbe	
Kontaktlinsen/ Brille	
Raucher	

Der heutige Tag	**ja**	**nein**	**Bemerkungen**
schlecht geschlafen			
Großer Stress			
Große Müdigkeit			
Große Lustlosigkeit			
Starkes Unwohlsein			
Optimale Sehschärfe			
Alkohol konsumiert			
koffeinhaltige Getränke			
körperliche Anstrengung			
Schmerzen			
Medikamente: Welche?			

Allgemeiner Gesundheitszustand	**ja**	**nein**	**Bemerkungen**
Atemwegserkrankung			
Herz-Kreislauf-Probleme			
Blutdruck-Probleme			
Farbenblindheit			
Migräne			
Diabetes			
Neurologische Erkrankungen			
Drogenabhängigkeit			
Regelmäßige Medikamente			

Fragebogen zur Händigkeit

Denken Sie bitte genau über die folgenden Fragen nach und beantworten Sie sie, indem Sie RECHTS (x) oder LINKS (x) ankreuzen. Wenn Sie sich sicher sind, dass beides zutrifft, notieren Sie bitte, welche Hand häufiger diese Aufgabe übernimmt.

Fragen	RECHTS	LINKS
Mit welcher Hand werfen Sie?		
Mit welcher Hand schreiben Sie?		
Mit welcher Hand zeichnen Sie?		
Mit welcher Hand üben Sie Sportarten oder Spiele wie Federball aus?		
Mit welcher Hand halten Sie eine Schere?		
Mit welcher Hand halten Sie einen Rasierapparat?		
Mit welcher Hand halten Sie einen Kamm?		
Mit welcher Hand halten Sie eine Zahnbürste?		
Mit welcher Hand halten Sie ein Messer, wenn Sie nicht essen, sondern z.B. einen Faden durchtrennen?		
Mit welcher Hand halten Sie einen Löffel?		
Mit welcher Hand halten Sie einen Hammer?		
Mit welcher Hand halten Sie einen Schraubendreher?		
In welcher Hand halten Sie das Messer?		
Wenn Sie mit einem Besen fegen, welche Hand befindet sich oben?		
Wenn Sie eine Harke benutzen, welche Hand befindet sich oben am Stil?		
Mit welcher Hand schrauben Sie den Deckel eines Glases auf?		
Mit welcher Hand zünden Sie ein Streichholz an?		
Mit welcher Hand teilen Sie Karten aus?		
Mit welcher Hand fädeln Sie einen Faden durch ein Nadelöhr bzw. stecken das Nadelöhr auf den Faden?		

Summe		

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	Summe Rechts
0,1	0,1	0,2	0,2	0,3	0,3	0,4	0,4	0,5	0,5	0,6	0,6	0,7	0,7	0,8	0,8	0,9	0,9	1	Summe Rechts/19

Angelehnt an: Oldfield, 1971

Instruktion (Happy vs. Sad)

Willkommen zum **i-View** Experiment. Wir untersuchen, wie gut Sie kurz dargebotene Reize (Smileys) unterscheiden können. Unterdessen zeichnen wir Ihre Pupillenreaktionen auf. Wenn Sie sich gleich an den Bildschirm setzen, versuchen Sie Ihren Kopf möglichst ruhig zu halten und konzentrieren Sie Sich bitte auf den Fixationspunkt. Unser Experiment besteht aus 2 Blöcken:

1. Block (3 Durchgänge à 5 Min)

Nach dem Startzeichen wird Ihnen jeweils nach einem akustischen Signal ein Smiley-Gesicht ganz kurz (ca. 40 ms) auf dem Bildschirm präsentiert, so dass Sie es kaum erkennen können. Dabei handelt es sich entweder um ein

positives oder ein

negatives

Gesicht, beides ist gleichwahrscheinlich. Damit diese Aufgabe nicht zu leicht ist, folgt unmittelbar darauf eine

Kombination

dieser beiden Gesichter (Maske).

Wenn Sie glauben, dass das zuerst präsentierte Gesicht positiv war, dann drücken Sie bitte die **linke Maustaste** und im anderen Fall die **rechte Maustaste**. War Ihre Vermutung richtig so ertönt ein tiefer Ton, bei einer falschen Antwort hingegen ein hoher Ton.

Um sich mit den Versuchsbedingungen vertraut zu machen beginnen wir mit einem Probedurchlauf.

Danach beginnt das eigentliche Experiment. Die Bedingungen sind genauso wie oben beschrieben, mit dem Unterschied, dass Sie diesmal kein Feedback (d.h. hohen oder tiefen Ton) erhalten. Bei Fragen wenden sie sich an ihren Versuchsleiter.

2. Block (3 Durchgänge à 4 Min): Reaktionszeit-Aufgabe

Nach dem Startzeichen werden ihnen die gleichen Smiley-Gesichter auf dem Bildschirm präsentiert, dieses Mal aber ohne Maske, so dass Sie sie leicht erkennen können. Identifizieren sie die Gesichter als positiv oder negativ **so schnell wie möglich** durch Drücken der linken Maustaste für positive Gesichter und der rechten Maustaste im anderen Fall. Bei Fragen wenden sie sich an ihren Versuchsleiter.

Danke und Viel Spaß!

Instruktion (Happy vs. Sad)

Willkommen zum **i-View** Experiment. Wir untersuchen, wie gut Sie kurz dargebotene Reize (Smileys) unterscheiden können. Unterdessen zeichnen wir Ihre Pupillenreaktionen auf. Wenn Sie sich gleich an den Bildschirm setzen, versuchen Sie Ihren Kopf möglichst ruhig zu halten und konzentrieren Sie Sich bitte auf den Fixationspunkt. Unser Experiment besteht aus 2 Blöcken:

1. Block (3 Durchgänge à 5 Min)

Nach dem Startzeichen wird Ihnen jeweils nach einem akustischen Signal ein Smiley-Gesicht ganz kurz (40 ms) auf dem Bildschirm präsentiert, so dass Sie es kaum erkennen können. Dabei handelt es sich entweder um ein

positives oder ein

negatives

Gesicht, beides ist gleichwahrscheinlich. Damit diese Aufgabe nicht zu leicht ist, folgt unmittelbar darauf eine

Kombination

dieser beiden Gesichter (Maske).

Wenn Sie glauben, dass das zuerst präsentierte Gesicht positiv war, dann drücken Sie bitte die **rechte Maustaste** und im anderen Fall die **linke Maustaste**. War Ihre Vermutung richtig so ertönt ein tiefer Ton, bei einer falschen Antwort hingegen ein hoher Ton.

Um sich mit den Versuchsbedingungen vertraut zu machen beginnen wir mit einem Probedurchlauf.

Danach beginnt das eigentliche Experiment. Die Bedingungen sind genauso wie oben beschrieben, mit dem Unterschied, dass Sie diesmal kein Feedback (d.h. hohen oder tiefen Ton) erhalten. Bei Fragen wenden sie sich an ihren Versuchsleiter.

2. Block (3 Durchgänge à 4 Min): Reaktionszeit-Aufgabe

Nach dem Startzeichen werden ihnen die gleichen Smiley-Gesichter auf dem Bildschirm präsentiert, dieses Mal aber ohne Maske, so dass Sie sie leicht erkennen können. Identifizieren sie die Gesichter als positiv oder negativ **so schnell wie möglich** durch Drücken der linken Maustaste für positive Gesichter und der rechten Maustaste im anderen Fall. Bei Fragen wenden sie sich an Ihren Versuchsleiter.

Danke und Viel Spaß!

Instruktion (Entdeckungs-Experiment im linken GF)

Willkommen zum Entdeckungs-Experiment. Wir untersuchen mit einem sogenannten Two-Alternative-Forced-Choice-Verfahren, wie gut Sie kurz dargebotene Reize (graue Scheiben) entdecken können. Die Reize sind sehr schwer zu erkennen: Wenn Sie sich unsicher sind, fragen Sie bitte Ihr ‚Gefühl': War die graue Scheibe eher da oder eher nicht da. Es gibt nur diese beiden Antwortmöglichkeiten.
Während Sie die Aufgaben bearbeiten, zeichnen wir Ihre Pupillenreaktionen auf. Für das Experiment sollten Sie Ihren Kopf möglichst ruhig halten und immer auf den Fixationspunkt schauen.
Unser Experiment besteht aus einem Übungsblock, in dem Sie sich mit der Aufgabenstellung vertraut machen können sowie zwei weiteren Blöcken, in denen das eigentliche Experiment durchgeführt wird (Dauer insgesamt: ca. 45 Minuten).

Übungsblock: Während sie auf dem Bildschirm den Fixationspunkt fixieren, erscheint nach einem Ankündigungston in Ihrem linken Gesichtsfeld entweder ganz kurz (50 ms) eine graue Scheibe oder es erscheint ein Leerreiz, also nichts. Wenn Sie glauben, dass die graue Scheibe tatsächlich dargeboten wurde, drücken Sie bitte die linke Maustaste, ansonsten die rechte. Benutzen Sie dazu bitte Ihre **linke Hand**. Im rechten Gesichtsfeld erscheint übrigens immer eine graue Scheibe, entscheidend für Sie ist allerdings, ob in Ihrem linken Gesichtfeld eine erschien. Kurz darauf erscheint eine sog. Maske, die die Entdeckung der grauen Scheibe erschwert. Im Übungsblock erhalten Sie ein akustisches Feedback (tiefer Ton für eine richtige, hoher Ton für eine falsche Antwort); daran können Sie sich zunächst einmal orientieren. Die grauen Scheiben kommen in 50 % der Trials. Trialdarstellung siehe Abb.1.

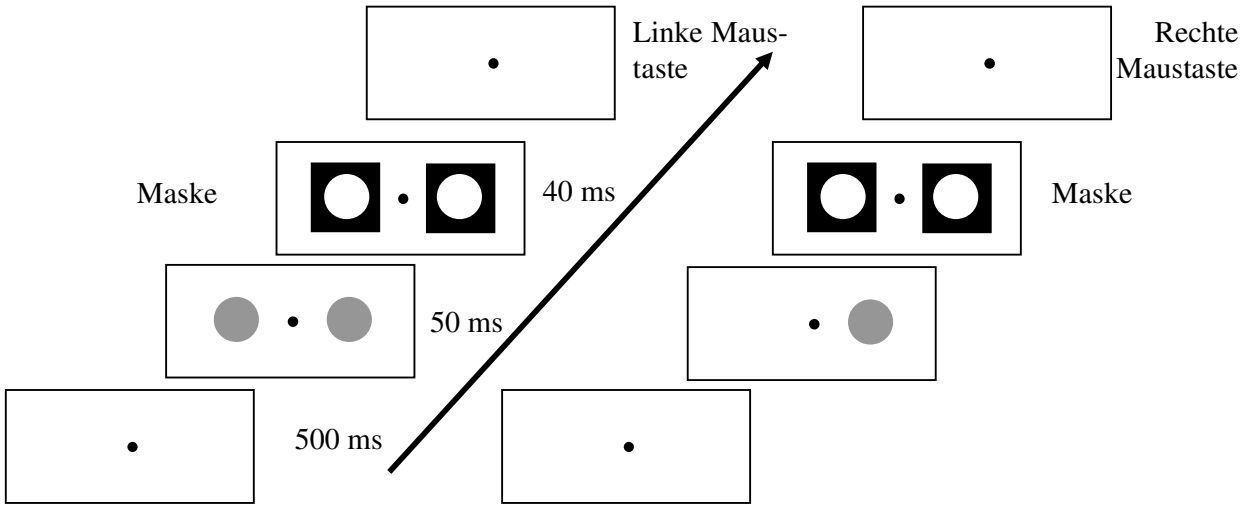


Abb.1: Trialdarstellung im Übungs-Block

Bitte wenden

Experimental-Phase (2 Blöcke mit je 6 Durchgängen à 40 Trials; pro Durchgang ~3 Min)

Die Aufgabenstellung ist wie in der Übungsphase. Es gibt jedoch drei Änderungen:

- die Darbietungszeit der grauen Scheibe bzw. der Leerreize verkürzt sich von 50 ms auf ca. 14 ms ! Dies macht die Aufgabe natürlich noch schwerer. Wir möchten Sie dennoch bitten, möglichst konzentriert die Aufgabe zu bearbeiten. Von den 24 Versuchspersonen, die wir untersuchen, erhalten die drei Versuchspersonen, die am besten „zu raten“ konnten, einen kleinen Preis.
- Um Sie nicht unnötig abzulenken, werden wir kein akustisches Feedback mehr geben.
- Nach jedem Durchgang (40 Trials) erfolgt eine Pause von mindestens 30 Sekunden.

Die grauen Scheiben erscheinen übrigens auch in dieser Phase in durchschnittlich 50 % der Trials. Nach jedem Block werden Sie gebeten anzugeben, wie gut Sie sich konzentrieren konnten und wie Sie Ihre Leistung einschätzen. Bitte seien Sie dabei realistisch, nicht zu optimistisch, nicht zu pessimistisch.
Das Ergebnis Ihrer Bemühungen – und welchen Platz Sie erringen konnten – erfahren Sie wenn wir alle Versuchspersonen getestet haben.

Haben Sie noch Fragen?

Wenn nicht, wünschen wir Ihnen viel Erfolg!
Herzlichen Dank für Teilnahme.

Instruktion (Entdeckungs-Experiment im rechten GF)

Willkommen zum Entdeckungs-Experiment. Wir untersuchen mit einem sogenannten Two-Alternative-Forced-Choice-Verfahren, wie gut Sie kurz dargebotene Reize (graue Scheiben) entdecken können. Die Reize sind sehr schwer zu erkennen: Wenn Sie sich unsicher sind, fragen Sie bitte Ihr ‚Gefühl': War die graue Scheibe eher da oder eher nicht da. Es gibt nur diese beiden Antwortmöglichkeiten.
Während Sie die Aufgaben bearbeiten, zeichnen wir Ihre Pupillenreaktionen auf. Für das Experiment sollten Sie Ihren Kopf möglichst ruhig halten und immer auf den Fixationspunkt schauen.
Unser Experiment besteht aus einem Übungsblock, in dem Sie sich mit der Aufgabenstellung vertraut machen können sowie zwei weiteren Blöcken, in denen das eigentliche Experiment durchgeführt wird (Dauer insgesamt: ca. 45 Minuten).

Übungsblock: Während sie auf dem Bildschirm den Fixationspunkt fixieren, erscheint nach einem Ankündigungston in Ihrem rechten Gesichtsfeld entweder ganz kurz (50 ms) eine graue Scheibe oder es erscheint ein Leerreiz, also nichts. Wenn Sie glauben, dass die graue Scheibe tatsächlich dargeboten wurde, drücken Sie bitte die rechte Maustaste, ansonsten die linke. Benutzen Sie dazu bitte Ihre **rechte Hand**. Im linken Gesichtsfeld erscheint übrigens immer eine graue Scheibe, entscheidend für Sie ist allerdings, ob in Ihrem rechten Gesichtfeld eine erschien. Kurz darauf erscheint eine sog. Maske, die die Entdeckung der grauen Scheibe erschwert. Im Übungsblock erhalten Sie ein akustisches Feedback (tiefer Ton für eine richtige, hoher Ton für eine falsche Antwort); daran können Sie sich zunächst einmal orientieren. Die grauen Scheiben kommen in 50 % der Trials. Trialdarstellung siehe Abb.1.

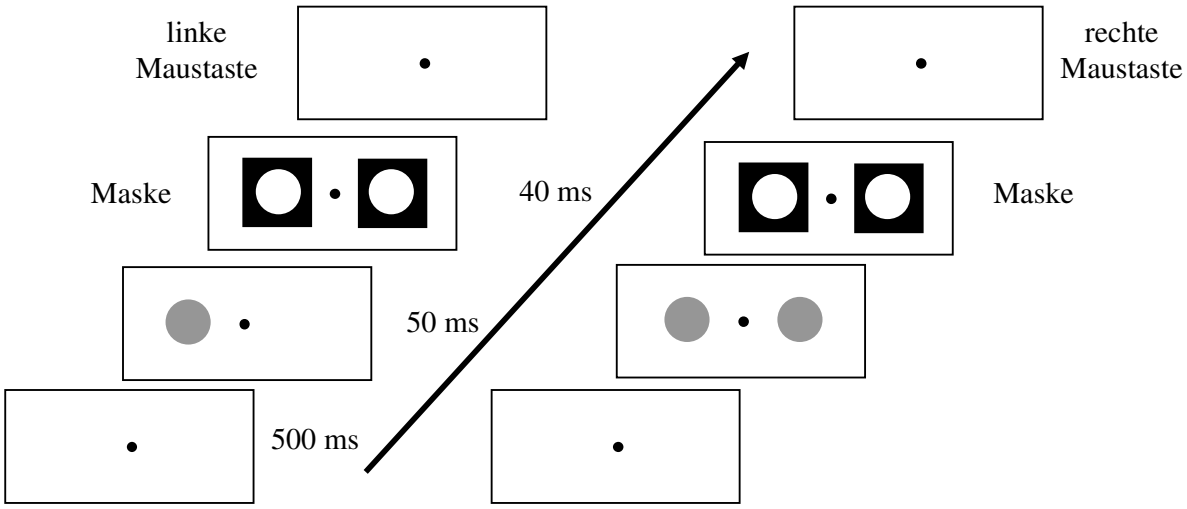


Abb.1: Trialdarstellung im Übungs-Block

Bitte wenden

Experimental-Phase (2 Blöcke mit je 6 Durchgängen à 40 Trials; pro Durchgang ~3 Min)

Die Aufgabenstellung ist wie in der Übungsphase. Es gibt jedoch drei Änderungen:

- die Darbietungszeit der grauen Scheibe bzw. der Leerreize verkürzt sich von 50 ms auf ca. 14 ms ! Dies macht die Aufgabe natürlich noch schwerer. Wir möchten Sie dennoch bitten, möglichst konzentriert die Aufgabe zu bearbeiten. Von den 24 Versuchspersonen, die wir untersuchen, erhalten die drei Versuchspersonen, die am besten „zu raten“ konnten, einen kleinen Preis.
- Um Sie nicht unnötig abzulenken, werden wir kein akustisches Feedback mehr geben.
- Nach jedem Durchgang (40 Trials) erfolgt eine Pause von mindestens 30 Sekunden.

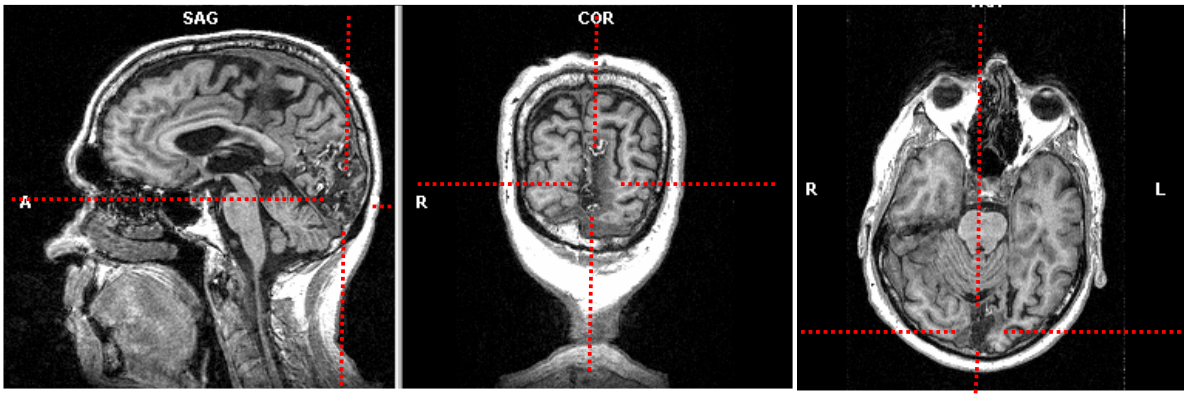
Die grauen Scheiben erscheinen übrigens auch in dieser Phase in durchschnittlich 50 % der Trials. Nach jedem Block werden Sie gebeten anzugeben, wie gut Sie sich konzentrieren konnten und wie Sie Ihre Leistung einschätzen. Bitte seien Sie dabei realistisch, nicht zu optimistisch, nicht zu pessimistisch.
Das Ergebnis Ihrer Bemühungen – und welchen Platz Sie erringen konnten – erfahren Sie wenn wir alle Versuchspersonen getestet haben.

Haben Sie noch Fragen?

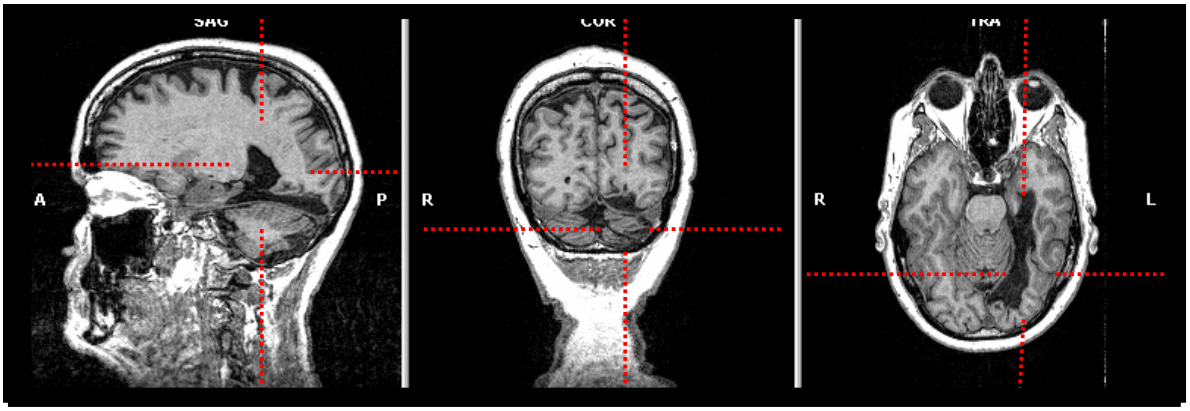
Wenn nicht, wünschen wir Ihnen viel Erfolg!
Herzlichen Dank für Teilnahme.

Kernspintomographische Aufnahmen der Patienten

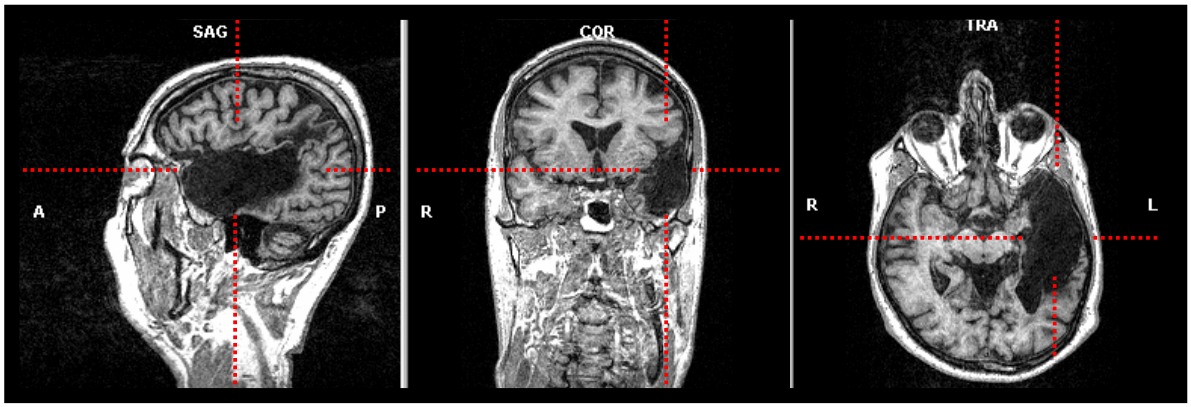
BF: Insult mit Läsion der Arteria cerebri posterior links; Folge: Homonyme Quadrantenanopsie im rechten untern GF



DH: Insult mit Läsion der Arteria cerebri posterior links; Folge: Homonyme Quadrantenanopsie („Tortenstück“, siehe Tab. 5) im rechten oberen GF

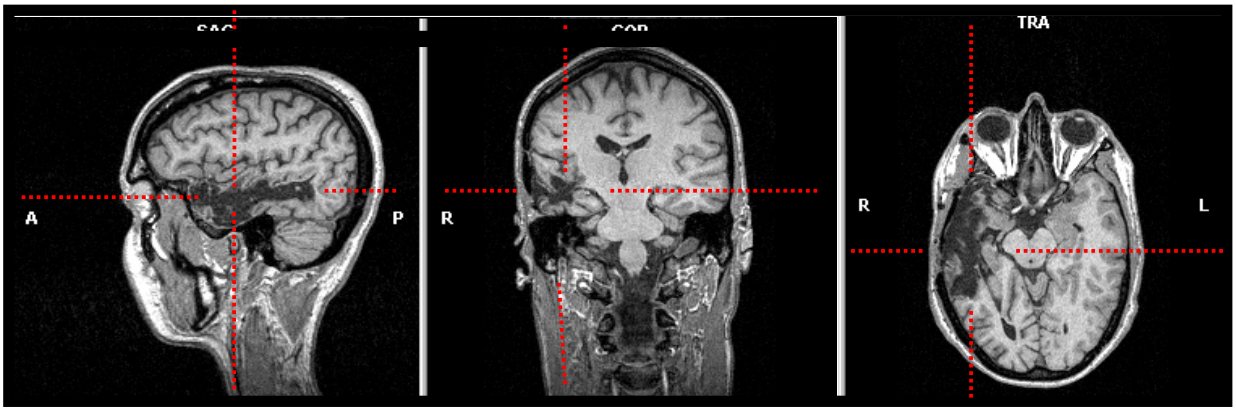


FS SHT mit Läsion der Arteria cerebri posterior links; Folge: Homonyme Quadrantenanopsie („Tortenstück“, siehe Tab. 5) im rechten oberen GF

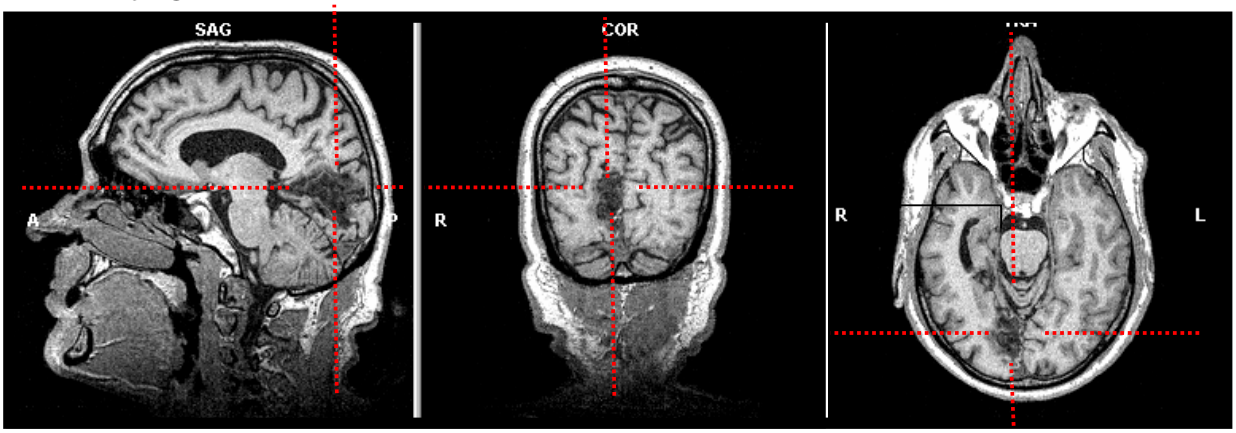
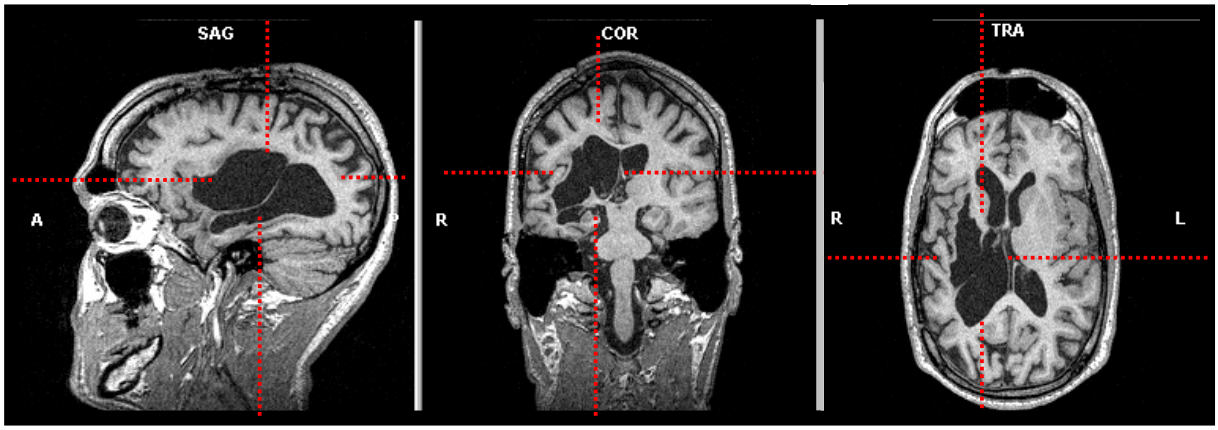


KHE: Insult mit Läsion der Arteria cerebri posterior links; Folge: Homonyme Quadrantenanopsie im rechten unteren GF; Patient lehnte MR-Aufnahme ab.

HH: Insult mit Läsion der Arteria cerebri media rechts; Folge: Quadrantenanopsie im linken oberen GF



HK: Insult mit Läsion der Arteria cerebri posterior rechts; Folge: Homonyme Hemianopsie im linken GF



MS: SHT mit Läsion der Arteria cerebri media rechts; Folge: Homonyme Hemianopsie im linken GF