

**Aus der Universitäts-Augenklinik Tübingen  
Abteilung Augenheilkunde II  
Ärztlicher Direktor: Professor Dr. E. Zrenner**

**Visuelle Orientierung beim Nachtsehen  
Ein Vergleich der Leistungsfähigkeit von peripherem und  
zentralem Gesichtsfeld**

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

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

**vorgelegt von  
Stephanie Frederike Lightner, geb. Plaz  
aus  
Mutlangen (Ostalbkreis)**

**2005**

Dekan: Professor Dr. C. D. Claussen

1. Berichterstatter: Professor Dr. M. Fahle

2. Berichterstatter: Professor Dr. C. Koch

## INHALT

<b>1.</b>	<b>Einleitung.....</b>	<b>1</b>
1.1.	Neuroanatomische Grundlagen.....	1
1.1.1.	Retina.....	1
1.1.2.	Sehen bei niedrigen Lichtintensitäten.....	2
1.1.3.	Peripheres und zentrales Gesichtsfeld.....	3
1.1.4.	Bewusstes und unbewusstes Sehen.....	5
1.1.5.	Einfluss der Aufmerksamkeit.....	7
1.2.	Exkurs : Messung von Licht.....	8
1.2.1.	Niedrige Lichtintensitäten in der Umwelt: Dämmerung (astronomische Definition).....	9
1.2.2.	Sehen bei niedrigen Lichtintensitäten: Dämmerungssehen und Nachtsehen (sinnesphysiologische Definition).....	9
1.3.	Das Experiment.....	10
1.3.1.	Fragestellung.....	10
<b>2.</b>	<b>Material und Methode.....</b>	<b>11</b>
2.1.	Versuchsdesign.....	11
2.2.	Sehweisen.....	12
2.2.1.	Technische Umsetzung der Sehweisen.....	12
2.3.	Versuchsvorbereitung und– ablauf.....	13
2.3.1.	Parcours.....	14
2.3.2.	Parcoursbestandteile.....	15
2.4.	Umgebungsbeleuchtung im Versuch.....	17
2.4.1.	Bestimmung der Lichtintensität in der Nacht.....	17
2.4.2.	Beleuchtungsanlage für den Parcours.....	19
2.5.	Messdatengewinnung.....	19
2.6.	Versuchspersonen.....	19
2.7.	Auswertung.....	20

<b>3.</b>	<b>Ergebnisse.....</b>	<b>21</b>
3.1.	Fehler.....	21
3.2.	Zeit.....	29
3.3.	Fehler und Zeit.....	37
3.4.	Fehler an Hindernissen.....	37
3.5.	Ergebnisse der Fragebögen.....	39
3.5.1.	Fragen zur Einschätzung des Schweregrads.....	39
3.5.2.	Fragen zu den einzelnen Sehweisen.....	44
3.5.2.1.	Vergleich der einzelnen Sehweisen.....	46
3.5.2.2.	Konzentration auf den Fixierpunkt.....	47
3.5.3.	Zeichnungen.....	49
3.6.	Zusammenfassung der Ergebnisse.....	53
<b>4.</b>	<b>Diskussion der Methode.....</b>	<b>54</b>
4.1.	Gesichtsfeld.....	54
4.2.	Compliance.....	55
4.3.	Nachtbeleuchtung.....	55
4.4.	Untersuchungsraum.....	56
4.5.	Messdatengewinnung.....	57
<b>5.</b>	<b>Allgemeine Diskussion.....</b>	<b>59</b>
5.1.	Fehler.....	59
5.2.	Zeit.....	65
<b>6.</b>	<b>Zusammenfassung.....</b>	<b>69</b>
<b>7.</b>	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>71</b>
<b>8.</b>	<b>Anhang.....</b>	<b>A-I</b>

## 1. Einleitung

### 1.1. Neuroanatomische Grundlagen

#### 1.1.1. Retina

Mit seinen Untersuchungen an der Retina hat Schultze schon 1866 (Schultze, 1866) den Grundstein für die Duplizitätstheorie des Sehens gelegt. Sie besagt, dass sich in der menschlichen Netzhaut zwei Typen von Sinneszellen (Fotorezeptoren) finden, die Lichtreize von der Außenwelt aufnehmen können. Die Zapfen, die für das Tagsehen verantwortlich sind und die Stäbchen, die das Sehen bei Nacht und in der Dämmerung vermitteln. Die Fähigkeit, in einem breiten Bereich sowohl hoher als auch geringer Lichtintensitäten sehen zu können, ist durch die unterschiedliche Lichtempfindlichkeit der Rezeptoren bedingt. Zum Einen reagieren die Sinneszellen unterschiedlich auf Licht verschiedener Wellenlängen im sichtbaren Spektrum (spektrale Sensitivität); (Wandell, 1995, Williamson und Cummins, 1983). Zum Anderen benötigen sie unterschiedliche „Mengen“ Lichts, das heißt, ihre Aktivität ist abhängig von der Beleuchtungsstärke. Fotopisches oder „Zapfensehen“ findet im Leuchtdichtebereich oberhalb  $3 \text{ cd} / \text{m}^2$  statt. Stäbchen reagieren bei Lichtintensitäten unterhalb  $0,01 \text{ cd} / \text{m}^2$ . Dies wird als skotopisches Sehen oder Nachtsehen bezeichnet. Der dazwischen liegende Bereich wird mesopisches Sehen oder Dämmerungsehen genannt, daran sind beide Fotorezeptorenarten beteiligt (Erco Light Scout, 2004).

Die  $5 \times 10^6$  Zapfen und  $10^8$  Stäbchen in der Netzhaut sind unterschiedlich verteilt. Im Bereich der Fovea (Durchmesser 1,5 mm) finden sich in den zentralen 0,5 mm ausschließlich Zapfen. Deren Zahl nimmt zur Gesichtsfeldperipherie hin ab, wogegen die Stäbchendichte am höchsten in der Peripherie zwischen  $10^\circ$  und  $20^\circ$  ist (Wandell, 1995). Damit leisten die Fotorezeptoren einen wesentlichen Teil der Anpassung des Sehsystems an die bis zu 50millionenfache Veränderung der Lichtintensität zwischen Tag- und Nachtbeleuchtung (Bloomfield und Dacheux, 2001). Dies ermöglicht dem Menschen Mobilität und Bewegungsfreiheit sowohl am Tage als auch in der Nacht.

### 1.1.2. Sehen bei niedrigen Lichtintensitäten:

#### Skotopisches Sehen und Dämmerungssehen

Häufig werden die Begriffe Dämmerungs- und Nachtsehen synonym gebraucht und als skotopisches Sehen bezeichnet. Skotopisches Sehen ist ausschließlich stäbchenvermittelt, beim Dämmerungssehen oder mesopischen Sehen sind beide Sinneszelltypen (Stäbchen und Zapfen) beteiligt (Lachenmayr, 2003).

Den Signaltransduktionsweg in der Säugetierretina beim Stäbchensehen haben Bloomfield und Dacheux (2001) beschrieben. Demzufolge wird Tag- beziehungsweise Nachtsehen in zwei parallelen vertikalen Wegen verarbeitet. Während für die Vermittlung des Tagsehens (Zapfenrezeptoren) mehrere unterschiedliche Bipolarzellen bekannt sind (Boycott und Wässle, 1991), gibt es für Stäbchen nur eine Sorte, so genannte ON- Bipolarzellen (Schiller, 1992). Von hier erfolgt die Transduktion nicht direkt auf Ganglienzellen, sondern zunächst über so genannte AII-Amakrine - Zellen. Diese sind synaptisch mit den Axonenden der Zapfenbipolarzellen verbunden, um dann auf Ganglienzellen und Horizontalzellen weitergeleitet zu werden.

Lennie und Fairchild (1994) haben in ihrer Arbeit mittels Sehschärfemessung im Gesichtsfeld untersucht, ob Stäbchensehen ausschließlich vom so genannten M- Verarbeitungskanal abhängt. Zum Besseren Verständnis dieser Einteilung in M- und P-Pfade lohnt sich folgende Ausführung:

Merigan und Maunsell (1993) haben in der Retina von Primaten zwei Arten von Ganglienzellen nachgewiesen, so genannte P und M - Zellen.

(M-Zellen, weil sie in die magnozellulären Schichten des Corpus geniculatum laterale projizieren, P-Zellen wegen der Axontermination in den parvozellulären Schichten des Corpus geniculatum laterale). P-Zellen haben kleine rezeptive Felder, langsamere axonale Leitungsgeschwindigkeit und sind farbsensitiv. M-Zellen haben große rezeptive Felder und weisen schnellere Leitungsgeschwindigkeiten auf. Sie sind ausserdem nicht farbsensitiv. Die Weiterleitung der Signale über verschiedene Ganglienzellen bleibt bis in den visuellen Kortex erhalten, es entstehen so zwei parallele visuelle Bahnen (Livingstone und Hubel, 1988). Der P-Kanal endet im inferotemporalen Kortex, einem der vielen der primären Sehrinde nachgeordneten visuellen Assoziationsgebiete, siehe

auch Van Essen und Maunsell, 1984. Signale aus dem M-Kanal gelangen nach dem primären visuellen Kortex hauptsächlich in den posterior-parietalen Kortex.

Der inferotemporale Kortex spielt eine wesentliche Rolle bei der Objekterkennung, während der parietale Kortex (area MT) mit der räumlichen Organisation und der Bewegung von Objekten befasst ist.

Die Hypothese von Lennie und Fairchild, dass Stäbchensehen ausschließlich vom M-Pfad abhängt, lässt sich nicht bestätigen, da das M-Mosaik nicht ausreicht, um die Sehschärfevariabilität zu erklären, sodass auch P-Zellen beteiligt sein müssen (Schiller und Logothetis, 1990). Die ausschließliche Spezialisierung der M und P-Wege wird auch in nachfolgenden Studien angezweifelt. Die sinnesphysiologische Trennung von Stäbchen- und Zapfensehen beziehungsweise Tag- und Nachtsehen findet kein eindeutiges neuroanatomisches Korrelat auf höheren Ebenen des visuellen Verarbeitungsprozesses.

Häufiger findet man die Unterscheidung von peripherem und zentralem Sehen.

Dies soll im Folgenden betrachtet werden.

### **1.1.3. Unterschiede im Gesichtsfeld:**

#### **Peripheres und zentrales Gesichtsfeld**

Die Existenz zweier Fotorezeptortypen und Zellpopulationen mit unterschiedlicher Spezialisierung und deren räumliche Verteilung in der Retina lässt an eine separate oder vergleichende Betrachtung von peripherem und zentralem Sehen denken. Auf kortikaler Ebene ordnen Ungerleider und Mishkin (1982) in ihrem Modell zur parallelen Organisation der visuellen Reizverarbeitung verschiedene Gesichtsfeldareale verschiedenen Gebieten im extrastriären Kortex zu. Sie stellen unter anderem fest, dass der posterior-parietale Kortex einen größeren Anteil an Eingängen von medialen V1-Anteilen erhält, welche das periphere Gesichtsfeld repräsentieren. Diese posterior - parietalen Gebiete erhalten 60% ihrer Signale von Arealen außerhalb der Fovea. Dagegen erhalten 100% der inferotemporalen kortikalen Neurone Informationen aus der Fovea. Bei Milner und Goodale (1995) finden sich weitere Vorschläge für die Verarbeitung zentraler und peripherer visueller Reize. Nach Trevarthen (1968) vertreten

## 4 Einleitung

---

die Autoren die Auffassung, dass Projektionen von der Retina zum Colliculus superior das periphere und geniculostriatale Projektionen das zentrale Sehen vermitteln.

Bei der Betrachtung auf retinaler Ebene soll die periphere Dominanz-Hypothese, wie sie von Dichgans und Brandt (1978) aufgestellt worden ist, nicht unerwähnt bleiben. Hier spielt die periphere Retina eine dominierende Rolle bei der Perzeption von (Eigen) - Bewegung und räumlicher Orientierung, im Gegensatz dazu ist die Fovea auf die Mustererkennung und Objektidentifikation spezialisiert.

Weiterhin sind unzählige vergleichende Untersuchungen der Sehleistung von zentralem und peripherem Gesichtsfeld durchgeführt worden. Dabei handelt es sich meist um die für die Psychophysik klassischen Schwellenexperimente (zum Beispiel Harris und Fahle, 1996, Fahle und Schmid, 1988, Whitaker et al., 1993).

Bei diesen Experimenten, ob sie nun unter fotopischen oder skotopischen Bedingungen durchgeführt werden, darf man eine von Hess et al. (1990) erwähnte Tatsache nicht aus den Augen verlieren: Solche Werte, die mittels definierter Schwellenreize gemessen werden, lassen laut Hess et al. keine Aussage über die Ergebnisse bei überschwelligem Reizen (wie in unserem Versuch) zu. Hess bemängelt außerdem, dass die Untersuchung des peripheren Sehens durch Stäbchenisolation wegen unzureichender Schwellenbestimmung häufig misslingt (dazu siehe auch Georgeson und Sullivan, 1975).

Nur wenige Untersuchungen beschäftigen sich mit der Wahrnehmung von Objekten in verschiedenen Gesichtsfeldarealen unter Alltagsbedingungen. Thorpe et al. (2001) haben die Erkennung von Objekten in peripheren Gesichtsfeldarealen getestet. Dabei hat sich mit zunehmender Exzentrizität im Gesichtsfeld die Reaktionszeit bei gleichbleibender Fehlerrate verlängert. Alfano und Michel (1990) haben die Wegbewältigung in einem Parcours mit verschiedenen Gesichtsfeldeinschränkungen untersucht. Hier wird die Notwendigkeit von peripherer visueller Information zur Wegbewältigung belegt.

Noch weniger Untersuchungen existieren zum Vergleich zwischen zentralen und peripheren Gesichtsfeldarealen unter skotopischen Beleuchtungsverhältnissen. Chaparro und Young (1993) vergleichen das Lesevermögen mit zentralen und peripheren Gesichtsfeldarealen unter fotopischen und skotopischen Bedingungen. Sie weisen eine Überlegenheit der Fovea beim Lesen nach.



Welche Relevanz das Wissen um die Leistung zentraler und peripherer Gesichtsfeldteile beim Nacht- beziehungsweise Dämmerungssehen hat, zeigen Untersuchungen zur Verkehrssicherheit von Rumar (1990). Er macht die späte Detektion anderer Verkehrsteilnehmer (vor allem bei niedrigen Lichtintensitäten) im peripheren Gesichtsfeld für Unfallereignisse verantwortlich. In dieser Arbeit kommt auch ein weiterer wichtiger Aspekt zur Sprache: Für Rumar hängen Seheindrücke in der Peripherie des Gesichtsfelds mit unbewusster, Informationen aus den zentralen Arealen mit bewusster Wahrnehmung zusammen. Darauf soll im nächsten Abschnitt eingegangen werden.

#### **1.1.4. Bewusstes und unbewusstes Sehen:**

##### **Visuelles Bewusstsein und Blindsight**

Blindsight - blind und doch sehend? Auf den ersten Blick beinhaltet der Begriff einen Widerspruch. Riddoch (1917) beschreibt dieses Phänomen erstmals an im visuellen Kortex verletzten Soldaten.

Seine Beobachtungen liefern die Definition von Blindsight: Wahrnehmung visueller Reize ohne Bewusstsein derselben. Er postuliert, dass die Erkennung bewegter Reize trotz nachweislichen Ausfalls der primären Sehrinde möglich ist. Dies zeigen auch spätere Arbeiten, zum Beispiel von Blythe et al. (1986).

Andere Untersuchungen zeigen Blindsight nicht nur für bewegte Reize, sondern auch für die Erkennung räumlicher Orientierung von Objekten. (Perenin und Rosetti, 1996).

Mit diesen Untersuchungen an Patienten mit Teilausfällen im visuellen Kortex versucht die Kognitionswissenschaft, den Verarbeitungsstrukturen visuellen Bewusstseins auf die Spur zu kommen. In diesen Experimenten (wie zum Beispiel Perenin und Rosetti, 1996 oder Milner, 1995), ist meist keine Aussage über Form und Gestalt von Objekten möglich. Dennoch ist die visuomotorische Antwort (bezüglich Bewegung und Orientierung) korrekt erfolgt. Daraus zieht Milner den Schluss, dass bewusste und unbewusste Wahrnehmung an zwei verschiedene kortikale Systeme gebunden sind. Bewusste Wahrnehmung erfolgt Milner zufolge über den ventralen Trakt (temporale Bahnen, die auch der Objektwahrnehmung dienen), unbewusste Wahrnehmung erfolgt über den dorsalen (okzipitalen) Trakt der kortikalen visuellen Bahnen (die auch der Be-

## 6 Einleitung

---

wegungswahrnehmung dienen). Dass unbewusstes Sehen bei Blindsight-Patienten ohne direkten Beitrag des striären Kortex (V1) erfolgt, (nämlich über retinotektale Parallelbahnen vom Colliculus superior und Pulvinar von subkortikal direkt zu extrastriären Hirnregionen), postulieren Koch und Braun (1996) auf der Grundlage neuroanatomischer Studien. Im Gegensatz dazu wird für die bewusste Wahrnehmung von Reizen eine Beteiligung präfrontaler zerebraler Regionen postuliert (Crick und Koch, 1995, Zeman, 2001, Sahraie et al., 2002). Weiskrantz postuliert 1998 die Existenz von zwei Arten von Blindsight. Typ I mit visueller Leistung in Abwesenheit bewusster Wahrnehmung, Typ II, Diskrimination von Reizen im blinden Feld mit Bewusstsein des Ereignisses, aber ohne bestätigenden Seheindruck. Diese Fähigkeiten besitzt nach Weiskrantz der Patient G.Y., der schnell bewegte Stimuli in seinem blinden Gesichtsfeldanteil bewusst detektiert, ohne dass er einen Seheindruck angibt. Bei langsam bewegten Reizen erfolgt eine Diskrimination ohne jede bewusste Wahrnehmung. Dies veranlasst Zeki und Ffytche (1998), mittels funktioneller Magnetresonanztomographie nach den jeweils aktivierten kortikalen Arealen bei bewusster und unbewusster Wahrnehmung zu suchen. Hierbei findet sich sowohl bei der Detektion als auch bei der Diskrimination immer nur eine Aktivierung des Gebiets V5 ohne Aktivität von V1. Die daraus folgende Hypothese nimmt an, dass bewusste und unbewusste Wahrnehmung lediglich im kortikalen Aktivierungsniveau zu unterscheiden sind. Dieselbe Meinung vertritt auch Ingram (2002).

Die neuesten Hypothesen bezüglich des visuellen Bewusstseins formuliert Zeki in seinem Artikel von 2001. Hier wird die Verarbeitung visueller Reize in zeitlich und räumlich getrennten hierarchischen Systemen, so genannten „Knotenpunkten“ postuliert. Daraus folgt eine perzeptuelle Asynchronität im visuellen Kortex, in dem auf verschiedenen Ebenen bewusste Wahrnehmung möglich ist. Hierbei unterscheiden sich Probanden mit geschädigtem visuellem Kortex von denen mit intaktem Sehsystem. Sehen ohne Bewusstsein bei gesunden Probanden haben Kolb und Braun (1995) und Moutoussis und Zeki (2002) unter anderem über Aufgaben mit binokularer Rivalität erfolgreich untersucht.

Dass Blindsight nicht unumstritten ist, zeigt die Studie von Fendrich et al. (1992), die das Phänomen Blindsight über funktionierende „Inseln des Sehens“ im Skotom der Patienten erklären.

### **1.1.5. Bewusstes und unbewusstes Sehen**

#### **- mit oder ohne Aufmerksamkeit ?**

Grundsätzlich geht man von einer limitierten Verarbeitungskapazität im visuellen Kortex aus (Schneider und Schiffrin, 1977, Ungerleider und Kastner, 2000).

Mittels Aufmerksamkeit wird diese Kapazität gezielt eingesetzt. Durch verschiedene, vom Stimulus ausgehende (bottom-up) Prozesse und kortikale Mechanismen (top-down-Effekte) wird der Wettkampf um die kortikale Repräsentation reguliert (siehe auch Ungerleider und Kastner, 2000). Einer dieser Top-down-Prozesse ist die visuelle Aufmerksamkeit, die zur Akzentuierung von Objekten oder Lokalisationen in der visuellen Szene dient. Für diese Aufgabe sind hauptsächlich der Colliculus superior (über die Steuerung sakkadischer Augenbewegungen) sowie präfrontale Hirnregionen verantwortlich.

Milner und Goodale (1995) postulieren, dass Aufmerksamkeit im ventralen Weg mit bewusster Wahrnehmung verbunden ist, wenn Objekterkennung stattfindet. Im parietalen Weg erfolgt ebenfalls eine Selektion durch Aufmerksamkeit, die aber unbewusst bleibt und der visuomotorischen Reaktionsfähigkeit dient. In Untersuchungen von Goldberg und Bushnell (1981) wird dies ebenfalls deutlich. Hier können Affen bei zentraler Fixation einen peripheren Stimulus lokalisieren, ohne dass im Colliculus superior und im präfrontalen Kortex neuronale Aktivität nachgewiesen wird. Konträre Evidenz, Aufmerksamkeit sowohl im ventralen als auch im parietalen Verarbeitungsweg ergibt sich in der Untersuchung von Britten (1996).

Chun und Marois (2002) sprechen in ihrer Arbeit von funktioneller Blindheit. Hier ist aufmerksames Sehen gleich bedeutend mit bewusstem Sehen, umgekehrt ist Sehen ohne Aufmerksamkeit immer unbewusst. Dass Aufmerksamkeit und visuelles Arbeitsgedächtnis eng zusammenhängen, ist ebenfalls bekannt. Beide Prozesse teilen neuronale Verbindungen im präfrontalen Kortex und ähnliche beeinflussende Modulationsmechanismen (siehe Funahashi et al., 1993, Desimore, 1998).

### 1.2. Exkurs:

#### Messung von Licht

Für das Verständnis dieser Arbeit ist ein kurzer Abriss über die Natur des Lichts und dessen Erfassung hilfreich. Licht besteht aus elektromagnetischen Wellen. Damit ist ein Energietransport verbunden.

Licht wird je nach Fragestellung in verschiedenen Einheiten gemessen und angegeben.

Die physikalische Strahlungsmessung bewertet Licht nach seiner Energie:

Energiestrom  $\phi = \text{Energie/Zeit [J/s]} = \text{Watt}$ , wird als „radiant flux“, Lichtstrom bezeichnet. Welche Wirkung hat das Licht einer bestimmten physikalischen Energie auf das Auge? Um die visuell wahrgenommene „Lichtmenge“ beschreiben zu können, benötigt man fotometrische Einheiten. Der Begriff des Lumens wird definiert (nach der Vereinbarung der General Conference on weights and measures, 1979), (siehe Williamson und Cummins, 1983) als die Lichtmenge einer monochromatischen Strahlung mit der Frequenz von  $540 \times 10^{12}$  Hz und der Energie von  $1/683$  Watt. Anders ausgedrückt: Ein Watt monochromatischen Lichts mit der oben genannten Frequenz ergibt 683 Lumen.

Bisher ging man von Lichtquellen aus, deren Lichtintensität in alle Richtungen gleich ist. Da dies meist nicht der Fall ist, muss ein Maß für den Raumwinkel mit einbezogen werden. Was physikalisch die Strahlungsintensität im Raum (= Watt / Steradian) ist, entspricht physiologisch der Lichtintensität (= Lumen / Steradian). Steradian bezeichnet den Winkel mit dem Scheitelpunkt in der Mitte einer Kugel (Radius von einem Meter), der aus der Kugelkappe die Fläche von einem Quadratmeter herausschneidet. Lumen / Steradian bezeichnet man mit der Einheit Candela. Diese Definition gilt nur für punktförmige Lichtquellen. Handelt es sich um eine flächenhafte Lichtquelle, wird die Fläche mit einbezogen: Candela /  $\text{m}^2$  ist die Einheit für die Lichtstärke oder Leuchtdichte. Für den Fall, dass eine Aussage über die Lichtstärke einer Quelle im Bezug auf einen Empfänger beschrieben werden soll, benutzt man den Begriff Beleuchtungsstärke = Candela x Steradian /  $\text{m}^2 = \text{Lux}$ .

Eine weitere Einheit, ein Troland wird für die Beleuchtungsstärke der Retina benutzt, die entsteht, wenn das Auge mit einer Pupillenfläche von  $1 \text{ mm}^2$  eine Fläche mit einer Leuchtdichte von  $1 \text{ cd} / \text{m}^2$  betrachtet (nach Pohl, 1976, Wandell, 1995).

### **1.2.1. Niedrige Lichtintensitäten in der Umwelt:**

#### **Dämmerung (astronomische Definition)**

Dämmerung (englisch: Twilight) ist ein Begriff aus der Astronomie. Sie beginnt mit Sonnenuntergang und endet mit Sonnenaufgang.

Dabei wird die Dämmerung in mehrere Phasen eingeteilt. Zunächst die bürgerliche Dämmerung (Sonnenstand  $-6^\circ$ ). Dann folgen die nautische Dämmerung (Sonnenstand  $-12^\circ$ ) und die astronomische Dämmerung (Sonnenstand  $-18^\circ$ ).

Während der nautischen Dämmerung beträgt die indirekte Beleuchtung einer horizontalen Fläche durch die Sonne ungefähr  $6 \times 10^{-4}$  Lux. (Die Beobachterposition sowie der Einfluss der Lichtquelle und der meteorologischen Bedingungen bleibt unberücksichtigt). Nach dem Ende respektive vor dem Beginn der bürgerlichen Dämmerung sind für Aussenaktivitäten künstliche Lichtquellen erforderlich. Sterne und „airglow“ zusammen erzeugen eine Illumination von  $2 \times 10^{-3}$  Lux. (Astronomical Almanac, Explanatory Supplement, 1992).

### **1.2.2. Sehen bei niedrigen Lichtintensitäten:**

#### **Dämmerungssehen und Nachtsehen (sinnesphysiologische Definition)**

Die Vermittlung visueller Eindrücke aus der Umwelt erfolgt über die Fotorezeptoren der Retina. Die Netzhaut besteht aus einem Mosaik verschiedener Rezeptoren.

Tages- und Farbsehen sind eine Funktion des Zapfenapparates, das Nachtsehen wird durch den Stäbchenapparat vermittelt. (siehe auch Abschnitt 1.1.1., Retina).

Die Lichtintensität, die die verschiedenen Fotorezeptortypen für ihre spezifische Funktion benötigen, ist je nach Rezeptortyp unterschiedlich. Für das Zapfensehen, auch fotopisches Sehen genannt, benötigt man Lichtintensitäten oberhalb  $3 \text{ cd} / \text{m}^2$ .

Im Übergangsbereich zwischen fotopischem und skotopischem Sehen spricht man vom mesopischen Sehen oder Dämmerungssehen. Es findet in einem Leuchtdichtebereich zwischen  $0,01 \text{ cd} / \text{m}^2$  und  $3 \text{ cd} / \text{m}^2$  statt. Hier sind beide Rezeptortypen beteiligt.

Stäbchensehen oder skotopisches Sehen findet bei Lichtintensitäten unterhalb von  $0,01 \text{ cd} / \text{m}^2$  statt (Erco Light Scout, 2004).

### 1.3. Das Experiment

In diesem Experiment soll

1. Die Leistungsfähigkeit des peripheren gegenüber dem zentralen Gesichtsfeld bezüglich der visuellen Orientierung beim Nachtsehen untersucht werden.
2. Der Frage nachgegangen werden, ob peripheres Sehen mit unbewusstem und zentrales Sehen mit bewusstem Sehen gleichgesetzt werden kann.

#### 1.3.1. Fragestellung

Die Hypothese, dass beim Einsatz des peripheren Gesichtsfelds die Orientierung in einem Parcours bei Nachtbeleuchtung leichter fällt als beim Einsatz des zentralen Gesichtsfelds, soll geprüft werden.

## 2. Material und Methode

Im vorliegenden Versuch werden die Erkenntnisse der Psychophysik angewandt, um Aussagen über die Leistungsfähigkeit des peripheren gegenüber dem zentralen Gesichtsfeld zu machen.

Das Experiment wird als Paarvergleichsstudie mit einer Kontrollbedingung und Messwiederholungen angelegt.

### 2.1. Versuchsdesign

Die Probanden gehen bei Nachtbeleuchtung durch einen Parcours mit 100 Hindernissen. Dabei durchlaufen sie den Versuch mehrmals, sie benutzen dabei nacheinander verschiedene Teile des Gesichtsfelds. So ergeben sich fünf verschiedene „Sehweisen“, mit denen der Hindernisparcours pro Versuchstag durchlaufen wird. Die Aufgabe für die Versuchsteilnehmer besteht darin, den Parcours zu bewältigen, ohne an eines der Hindernisse zu stoßen. Stößt ein Proband an ein Hindernis, zählt dies als „nicht gesehen“ und wird als Fehler gewertet.

Es gibt vier verschiedene Aufstellungen der Hindernisse, das heißt, vier verschiedene Parcours. Diese werden von den Probanden an vier Versuchstagen mit jeweils allen Sehweisen durchlaufen. So ergeben sich die Messwiederholungen. Die vier Termine pro Proband finden innerhalb von zwei Wochen im Abstand von zwei und vier Tagen statt. (Termine entweder montags und mittwochs oder dienstags und donnerstags).

In welcher Reihenfolge die Probanden die fünf verschiedenen Sehweisen an einem Tag durchlaufen, ist randomisiert. Die Versuchsdauer pro Tag und Teilnehmer beträgt ungefähr eine Stunde. Vor Beginn der Tests werden die Probanden über den Ablauf der Untersuchung aufgeklärt und es wird eine Visusuntersuchung durchgeführt.

Die Zustimmung zur Versuchsdurchführung ist vorab von der Ethikkommission der Universität eingeholt worden.

### 2.2. Sehweisen

Zur vergleichenden Untersuchung des Sehens mit zentralem und peripherem Gesichtsfeld bei Nachtbeleuchtung werden fünf **Sehweisen** entworfen, mit denen der Parcours durchlaufen wird:

1. Einsatz des zentralen und peripheren Gesichtsfelds ohne die Fovea ( zentrale 0,5 mm) beim Blick geradeaus: **zentral und peripher Gegenwart+Zukunft**
2. Einsatz des peripheren Gesichtsfelds mit Blick geradeaus: **peripher / Zukunft**
3. Einsatz des zentralen Gesichtsfelds (30°) mit Blick zum Boden: **zentral / Gegenwart**
4. Einsatz des zentralen Gesichtsfelds (30°) mit Blick geradeaus: **zentral / Zukunft**
5. Kontrollbedingung- ohne visuelle Information: **Blind**

In die Bezeichnung der Sehweisen fließt die Vorstellung ein, dass beim Gebrauch unterschiedlicher Gesichtsfeldanteile der Zeitpunkt der Reizverarbeitung zu einem Unterschied in der Wahrnehmung führt. Beim Blick zum Boden (Gegenwart) werden die Hindernisse gesehen, und die visuelle Wahrnehmung wird in der Gegenwart in Aktion umgesetzt.

Ist der Blick geradeaus gerichtet (Zukunft), werden die zu umgehenden Objekte gesehen, der visuelle Eindruck wird aber erst verzögert für die Aktion relevant.

#### 2.2.1. Technische Umsetzung der Sehweisen

In der Sehweise **peripher / Zukunft** tragen die Probanden eine in 25 cm Augenabstand befestigte schwarze Scheibe mit einem Durchmesser von 25 cm. Im Zentrum der Scheibe befindet sich ein selbstleuchtendes, winziges Dreieck zur Blickorientierung. So werden die zentralen 30° des Gesichtsfelds verdeckt.



In der Sehweise **zentral / Zukunft** stehen durch eine (innen schwarze) „Lochbrille“ aus Pappe mit Öffnungen eines Durchmessers von 0,25 cm nur etwa die zentralen 30° des Gesichtsfelds zur visuellen Orientierung zur Verfügung.

Sehen die Probanden mit dem **zentralen** Gesichtsfeld in der **Gegenwart**, tragen sie ebenfalls die oben genannte Lochbrille mit 30°- Öffnungen, der Blick ist jedoch zum Boden gerichtet.

Die Sehweise **zentral und peripher / Gegenwart und Zukunft** wird durch eine (im Durchmesser) 0,5 cm große Fixierscheibe aus selbstleuchtender Zinksulfidfolie realisiert, die in 25 cm Stirnabstand angebracht ist. Diese an einem Drahtstab über ein Stirnband befestigte Fixierscheibe soll den Einsatz der Fovea bei dieser Sehweise verhindern, wobei die parafoveale Region benutzt werden kann.

In der Kontrollbedingung „**Blind**“ tragen die Teilnehmer eine mit lichtundurchlässiger Folie ausgeschlagene Schwimmbrille. Hier steht keine visuelle Information zur Verfügung.

### **2.3. Versuchsvorbereitung und -ablauf**

Für den Versuch wird ein Kellerabschnitt des Institutsgebäudes vorbereitet.

Zur Verdunklung desselben werden lichtdurchlässige Türen oder Ritzen mit lichtundurchlässiger Teichfolie abgeklebt. Damit ist der Einfluss von Störlichtquellen ausgeschaltet. Im Folgenden werden die 100 Hindernisse und Treppen oder Rampen der Anordnung des jeweiligen Versuchstags zufolge an den dafür vorgesehenen Positionsmarken aufgestellt (siehe Seite 14, Parcours). Vor Beginn jedes Versuchstags wird die kleine Fixierscheibe für die Sehweise zentral und peripher / Gegenwart und Zukunft bei gewöhnlicher Raum - Neonbeleuchtung 60 Minuten aufgeladen.

Der Teilnehmer wird in einem Vorbereitungsraum mit einem Helm, an dem die Kamera für die Fehleraufzeichnung befestigt ist, ausgestattet. Außerdem werden Knie- und Handgelenksschoner angelegt. Zwei Infrarotscheinwerfer werden mit Wärmeschutz an beiden Schienbeinen des Probanden befestigt.

Im Flurabschnitt wird durch eine Beleuchtungsanlage eine definierte Lichtintensität geschaffen, die der natürlichen Beleuchtung bei nautischer Dämmerung entspricht. Nach einer fünfundzwanzigminütigen Dunkeladaptationsphase des Freiwilligen im komplett abgedunkelten Vorbereitungsraum beginnt die Versuchsdurchführung.

Zu Anfang stellt sich der Proband an der Startlinie des Parcours auf. Im Folgenden durchläuft er den Parcours jeweils von der Start- bis zur Ziellinie mit einer bestimmten Sehweise.

Um einen Lerneffekt durch Wegwiederholungen möglichst gering zu halten, erfolgt die Begehung der Strecke abwechselnd von beiden Enden des Parcours.

Zwischen den einzelnen Durchläufen (Sehweisen) halten sich die Teilnehmer kurzfristig in einem abgedunkelten Raum (jeweils am Ende des Parcours) auf, um ihre Dunkeladaptation während des Versuchs konstant zu halten. Dies ist notwendig, da der Versuchsleiter nach jedem Durchgang die durch Anstoß verschobenen Hindernisse (bei Normalbeleuchtung) wieder in die regelrechte Position bringt. Nach Beendigung des Versuchs füllt der Kandidat einen Fragebogen aus.

Dieser Ablauf ist an allen vier Versuchstagen des Gesamtversuchs identisch.

### 2.3.1. Parcours

100 Hindernisse, acht Treppen- und Rampenelemente sowie zwei mobile Bodenbeläge werden im Institutskeller als Hindernisparcours aufgestellt (siehe Anhang).

Das 23,5 m lange Flurstück wird für die Aufstellung und Vermessung in 13 Untereinheiten gegliedert.

Dabei hat jedes Element im jeweiligen Parcours eine mit x- und y-Koordinate festgelegte Position (Siehe Anhang). An jedem der vier Versuchstage wird eine andere Aufstellung der Parcoursbestandteile verwendet, um die möglichen Wege zu variieren. Zur Organisation wird für jeden Versuchstag eine Farbe definiert sowie den Hindernissen pro Versuchstag eine „Farbe“ zugeordnet.

Versuchstag 1: blau                      Versuchstag 2: schwarz

Versuchstag 3: rot                        Versuchstag 4: grün

So ergeben sich für jedes Hindernis vier unterschiedliche Positionen im Gesamtversuch (siehe Anhang). Die Position für die einzelnen Hindernisse ist mit einer Klebebandmarkierung in der jeweiligen Farbe am Boden gekennzeichnet (siehe Foto Seite 16).

### 2.3.2. Parcoursbestandteile

Der Testweg enthält 100 Hindernisse. Diese bestehen aus herkömmlichem Verpackungskarton, Pappe oder Papier. Unterschieden werden kann:

1. durch die Form:

50 Quader verschiedener Größe sowie 25 Kegel und 25 runde, kugelige Gebilde, letztere zusammengefasst als 50 „andere“.

2. durch Luminanz, das heißt, verschiedene weiss-grau-Abstufungen:

25 Stück weiss  $60 \text{ cd / m}^2$

25 Stück hellgrau  $25 \text{ cd / m}^2$

25 Stück mittelgrau  $20 \text{ cd / m}^2$

25 Stück dunkelgrau  $15 \text{ cd / m}^2$

Die Leuchtdichte des Untergrunds beträgt  $18 \text{ cd / m}^2$

Zur Erhöhung des Schwierigkeitsgrades und der Fehlerquote werden zusätzlich acht variabel kombinierbare Treppen- und Rampenelemente (Holzkonstruktion mit Linoleumbelag) eingebaut. Außerdem zwei mobile Bodenbeläge aus Gummi und Grobkies (Maße siehe Anhang). Als Beispiel folgen Abbildungen Nr. 1 a und b des Parcours am Versuchstag „grün“, aus beiden Richtungen fotografiert.



**Abbildung 1a: Parcours grün aus Richtung „1-100“ betrachtet**



**Abbildung 1b: Parcours grün aus Richtung „100-1“ betrachtet**

## **2.4. Umgebungsbeleuchtung im Versuch**

Die Untersuchung zu Leistungsfähigkeit des peripheren beziehungsweise des zentralen Gesichtsfelds soll bei Nachtbeleuchtung stattfinden. Da im Keller des Instituts nur künstliches Licht (Neonbeleuchtung) vorhanden ist und natürliches Licht nicht genutzt werden kann, müssen für das Experiment zunächst Bedingungen wie unter Nachtbeleuchtung geschaffen werden.

### **2.4.1. Bestimmung der Lichtintensität in der Nacht**

Um künstliche Nachtbeleuchtung herzustellen, werden zunächst eigene Daten über die natürliche Lichtintensität in der astronomischen Dämmerung gewonnen.

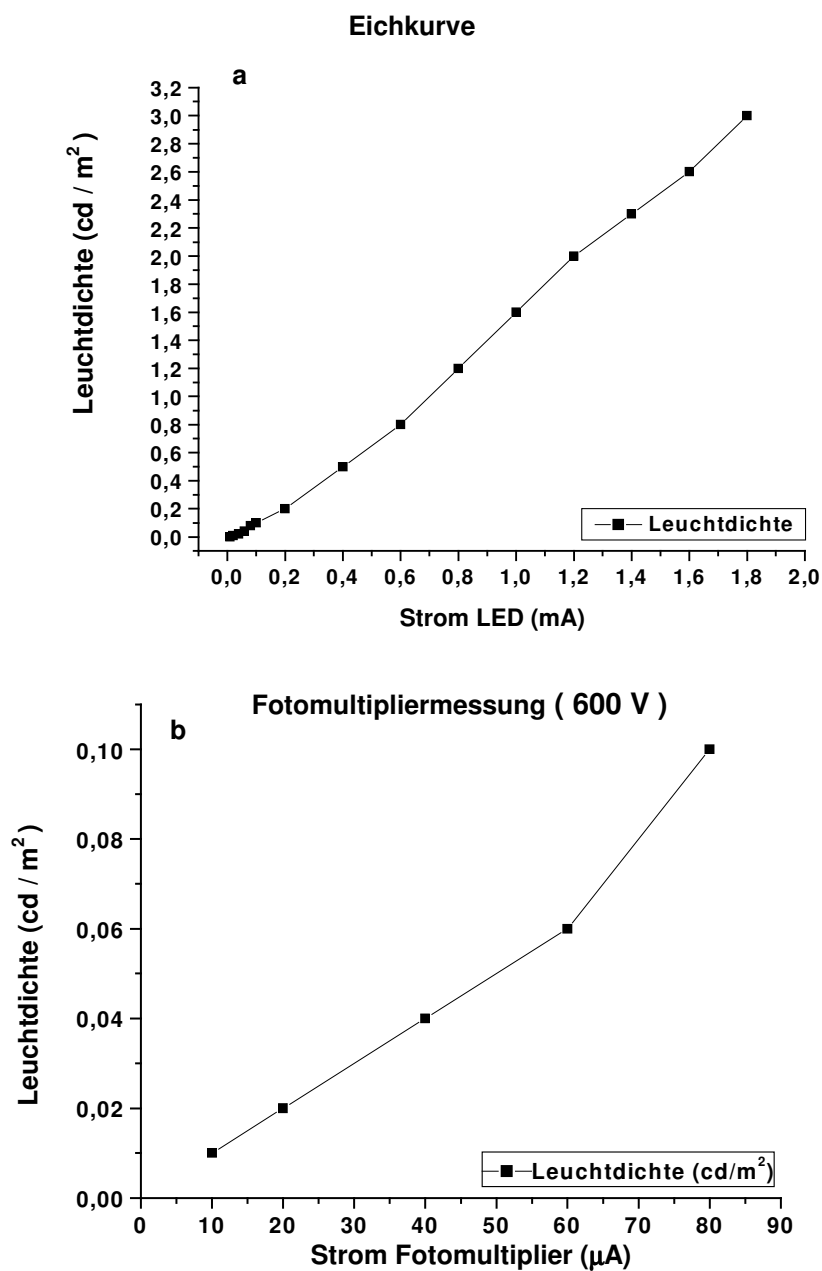
#### **Eigene Messungen der Lichtintensität bei astronomischer Dämmerung:**

Eigene Messungen werden mit einem Fotomultiplier durchgeführt und die Messwerte später über eine Eichkurve in die Einheit Leuchtdichte ( $\text{cd} / \text{m}^2$ ) umgerechnet.

Dies ist notwendig, da die Lichtintensität in der astronomischen Dämmerung im Grenzbereich der verfügbaren Leuchtdichtemessgeräte liegt und damit nicht zuverlässig bestimmbar ist. Verwendetes Messgerät: PMP R 928 (freundliche Leihgabe des Max-Planck-Instituts Tübingen von Professor Dr. Kirschfeld).

Die Messungen erfolgen an 14 Tagen verschiedener Mondphasen zwischen 5. Mai und 18. Juni 1997. Die Datenerhebung hat um 23<sup>15</sup> Uhr stattgefunden, zur Zeit astronomischer Dämmerung.

Ort der Messung ist Gäufelden (Wohnort der Versuchsleiterin). Da der Fotomultiplier strombetrieben arbeitet, kann - durch die notwendige Nähe zu einer Steckdose - der Einfluss von der Zivilisationsbeleuchtung nicht ganz ausgeschaltet werden. Hier bietet der am Ortsrand liegende Vorgarten des Hauses in Gäufelden bessere Bedingungen als die Umgebung des Tübinger Instituts. Anhand der mit den Fotomultiplier - Messungen erstellten Eichkurve kann eine realistische Beleuchtungsstärke ermittelt werden.



**Abbildung 2 a: LED-Eichkurve    b: Fotomultiplermessung**

Die niedrigsten gemessenen Werte sind mit dem Fotomultiplier am 26., 27. und 29. Mai (mit 600V Ausgangsspannung) ermittelt worden. Der Stromfluss betrug 1 mA. Dies entspricht der Beleuchtungsstärke des Parcours, die bei einer Betriebsspannung der Beleuchtungsanlage von 2 Volt entsteht. Umgerechnet entspricht dies einer Beleuchtungsstärke von  $0,001 \text{ cd / m}^2$ .

#### **2.4.2. Beleuchtungsanlage für den Parcours**

Für die Beleuchtung des Flures wird eine in der Lichtintensität beliebig regulierbare, mit Niederspannung betriebene Lichtanlage gebaut.

Als Lichtquelle werden Lämpchen wie die für die Nummernschildbeleuchtung von Autos verwendet. Dabei können je vier Lampen mit einem Netzgerät betrieben werden. Die Lampen sind im Abstand von zwei Metern an der Flurdecke über dem Parcours angebracht. So entsteht eine möglichst einheitliche Umgebungsbeleuchtung.

#### **2.5. Messdatengewinnung**

Die Fehlererfassung im Experiment erfolgt per Videoaufzeichnung mittels einer kabellosen infrarotsensitiven CCD- Kamera (Gigalink Freecam Cameraton der Firma Conrad Elektronik). Diese ist über eine Lederbandkonstruktion an einem Fahrradhelm fixiert, der vom Teilnehmer während der Versuche getragen wird. Durch Gurtzüge lässt sich der Winkel der Kameraposition (vom Helm zum Boden) für den optimalen Bildausschnitt (abhängig von der Größe) je Proband verändern. Die Kamera wird so eingestellt, dass die Füße der Testperson auch bei Vorwärtsbewegung im Bild liegen. Die Infrarotbeleuchtung der Hindernisaufstellung für die Fehleraufzeichnung tragen die Probanden ebenfalls mit sich. Dafür ist an jedem Schienbein der Freiwilligen ein Infrarotscheinwerfer (ebenfalls Firma Conrad) mittels Zuggurtung befestigt. Hitzeabschirmung ist durch Stücke einer handelsüblichen Campingisoliermatte gewährleistet. Die Energieversorgung der Strahler führen die Probanden in einem tragbaren Akkubatterieset (Firma Conrad), an einem Gürtel befestigt, mit sich. Mit Hilfe dieser Konstruktion ist eine mobile und kabellose Fehleraufzeichnung möglich.

#### **2.6. Versuchspersonen**

Als Probanden beteiligen sich fünfzehn Studentinnen und Studenten im Alter zwischen 25 und 35 Jahren. Alle Versuchspersonen weisen Normalsichtigkeit oder korrigierte Normalsichtigkeit auf. Das Vorliegen von Nachtblindheit und Farbfehlsichtigkeit wird anamnestisch ausgeschlossen.

### 2.7. Auswertung

Die Auswertung des Experiments erfolgt durch manuelle Auszählung der Fehler der Probanden. Durch Screening der Videoaufzeichnungen des Versuchsablaufs (durch den Versuchsleiter) werden Fehler in der Aufzeichnung erkannt und für die statistische Auswertung notiert. Hierfür wird jede einzelne Aufzeichnung (pro Sehweise und Tag) der Probanden im Zeitlupentempo des Videogeräts auf einem Fernsehschirm durchgesehen. Dabei werden die sichtbaren Anstöße an ein Hindernis notiert und die für den Durchlauf benötigte Zeit dokumentiert. Um die richtige Erkennung der Hindernisnummer zu sichern und nachzuprüfen, sind die Parcoursbestandteile des jeweiligen Versuchstags im Auswertungsraum von Nr. 1 bis 100 aufgestellt.

Die statistische Auswertung erfolgt mit JMP statistics (SAS Company) durch Multivarianzanalyse mit festem Einflussfaktor Sehweise und Versuchstag sowie zufälligem Faktor Versuchsperson. Die Effekte werden anschließend mittels Tukey-Kramer Honest Significant Difference Test berechnet.



### 3. Ergebnisse

#### 3.1. Fehler

Bei den dargestellten Ergebnissen wird das arithmetische Mittel der Fehler pro Sehweise mit Standardabweichung (als Stichprobe aus einer Grundgesamtheit) gewählt. Es sind jeweils die Daten von drei Probanden in einer Abbildung zusammengefasst.

Dabei bedeutet:

**z + p / G + Z** Sehweise: zentral + peripher / Gegenwart + Zukunft (kleiner Fixierpunkt)

**p / Z** Sehweise: peripher / Zukunft (grosser Fixierpunkt)

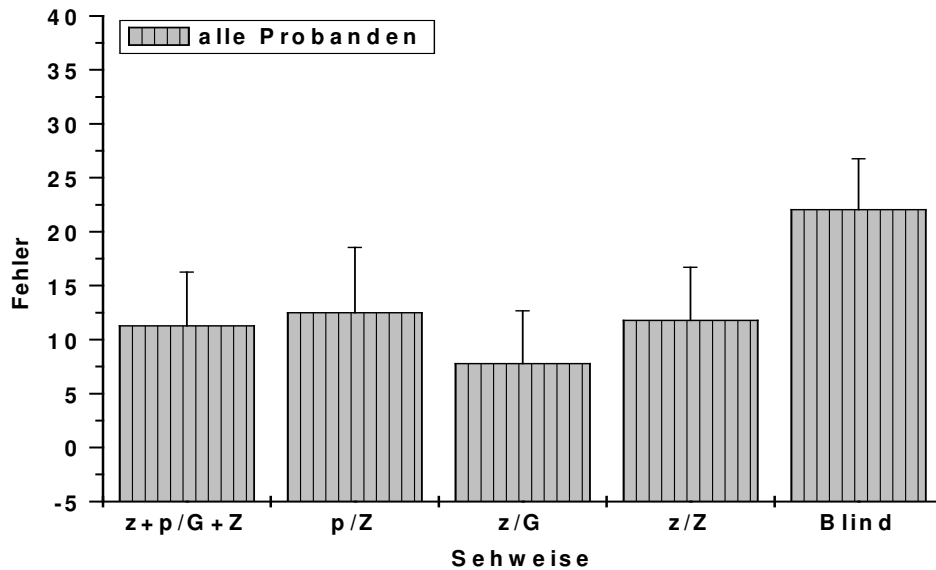
**z / G** Sehweise: zentral / Gegenwart (Lochbrille, Blick zum Boden)

**z / Z** Sehweise: zentral / Zukunft (Lochbrille, Blick gerade)

**Blind** Sehweise: Kontrolle ohne visuelle Information

Statistisch erfolgt die Auswertung über eine multifaktorielle Varianzanalyse, zunächst der Fehlerzahl, dann der benötigten Zeit pro Sehweise. Feste Einflussfaktoren sind Versuchstag und Sehweise, zufälliger Faktor ist die Versuchsperson. Effekte werden mit Tukey-Kramer Honest Significant Difference Test berechnet.

In Abbildung 3 ist die mittlere Gesamtfehlerzahl aller Probanden im Versuch für die einzelnen Sehweisen dargestellt.



**Abbildung 3: Mittlere Fehlerzahl aller Probanden pro Sehweise**

Die geringste Fehlerzahl (7,8 mit Standardabweichung 4,9) tritt beim Einsatz des **zentralen Gesichtsfelds in der Gegenwart** auf.

Statistisch unterscheidet sich diese Sehweise signifikant von allen anderen:

**Tukey-Kramer HSD Effect test (Irrtumswahrscheinlichkeit  $\alpha = 0,005$ )**

**für den Einflussfaktor Sehweise auf die Fehlerzahl**

Sehweise	verschieden zu	Differenz	untere Konfidenzgrenze	obere Konfidenzgrenze
z/G	z+p/G+Z	3,18	0,77	5,60
z/G	p/Z	5,20	2,78	6,72
z/G	z/Z	3,93	1,52	6,35
z/G	blind	siehe unt.	siehe unten	siehe unten

**Tabelle 1: Einflussfaktor Sehweise: zentral / Gegenwart**

Die Hypothese, dass das periphere Gesichtsfeld besser zur Orientierung bei Nachtbeleuchtung geeignet ist, wird in dieser Untersuchung nicht bestätigt. Das Gegenteil zeigt sich statistisch erwiesen: Das zentrale Gesichtsfeld scheint für die Orientierung bei Nachtbeleuchtung der Peripherie überlegen zu sein.

Im Vergleich **peripherer** und **zentraler** Sehweise in der **Zukunft** findet sich kein bedeutender Unterschied (12,5 und 11,8 Fehler mit Standardabweichung 6,0 und 4,9). Ebenso wenig unterscheidet sich die Sehweise mit Einsatz von **Zentrum und Peripherie / Gegenwart und Zukunft** (11,3 Fehler mit Standardabweichung 5,0) von den übrigen Sehweisen.

Die Kontrollbedingung (**Blind**) unterscheidet sich in der Fehlerzahl (22,0 mit Standardabweichung 4,7) am deutlichsten von allen anderen. Statistisch zeigt sich bei den Fehlern pro Sehweise ein signifikanter Unterschied der Kontrollbedingung (Blind) zu allen anderen Sehweisen:

**Tukey-Kramer HSD Effect test (Irrtumswahrscheinlichkeit  $\alpha = 0,005$ )  
für den Einflussfaktor Sehweise auf die Fehlerzahl**

Sehweise	verschieden zu	Differenz	untere Konfidenzgrenze	obere Konfidenzgrenze
blind	p+z/G+Z	11,12	8,69	13,53
blind	p/Z	9,10	6,68	11,51
blind	z/G	14,3	11,88	16,72
blind	z/Z	10,37	7,95	12,78

**Tabelle 2: Einflussfaktor Sehweise: Blind**

Auch im Vergleich der einzelnen Probanden mit ihrer mittleren Fehlerzahl pro Sehweise (Abbildungen 4 - 8) ist der Unterschied zwischen den zentralen und peripheren Sehweisen deutlich.

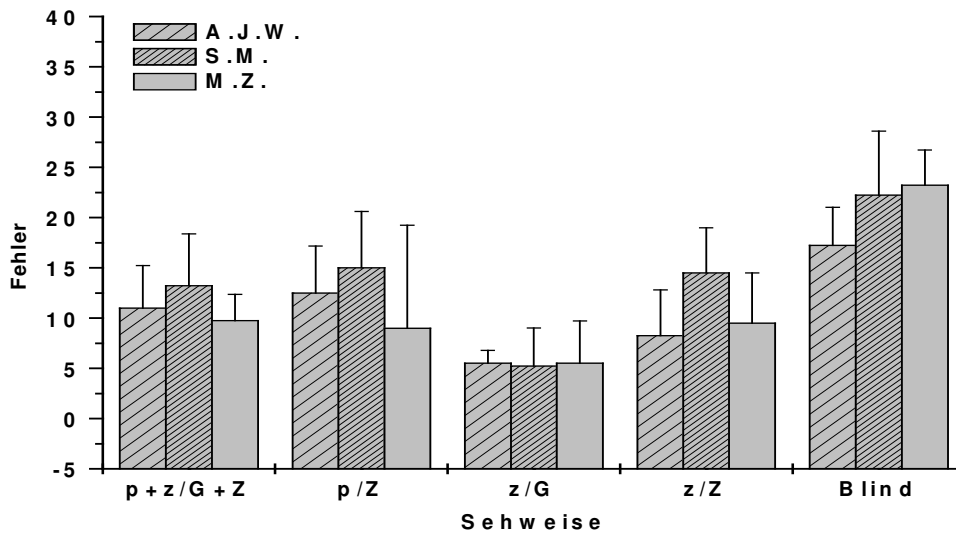


Abbildung 4: Mittlere Fehlerzahl der einzelnen Probanden pro Sehweise

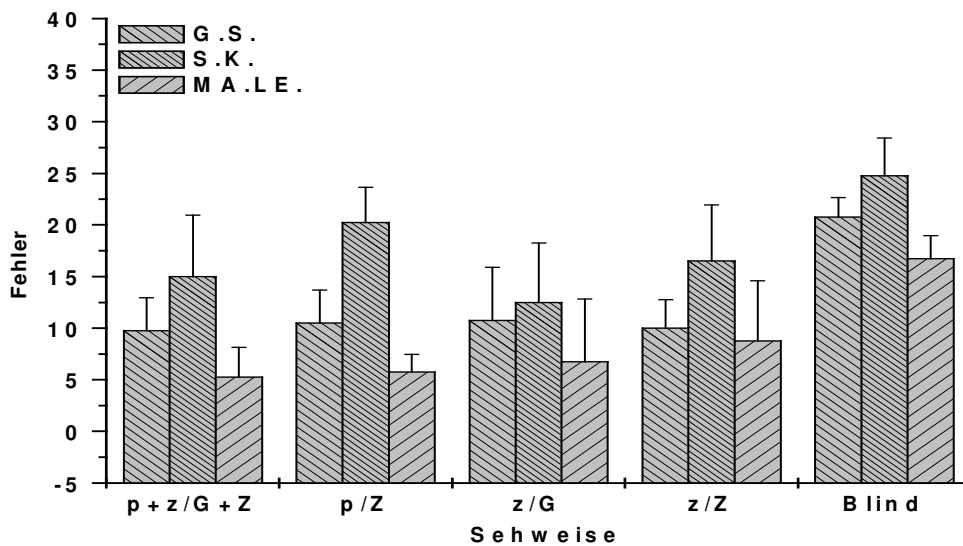


Abbildung 5: Mittlere Fehlerzahl der einzelnen Probanden pro Sehweise

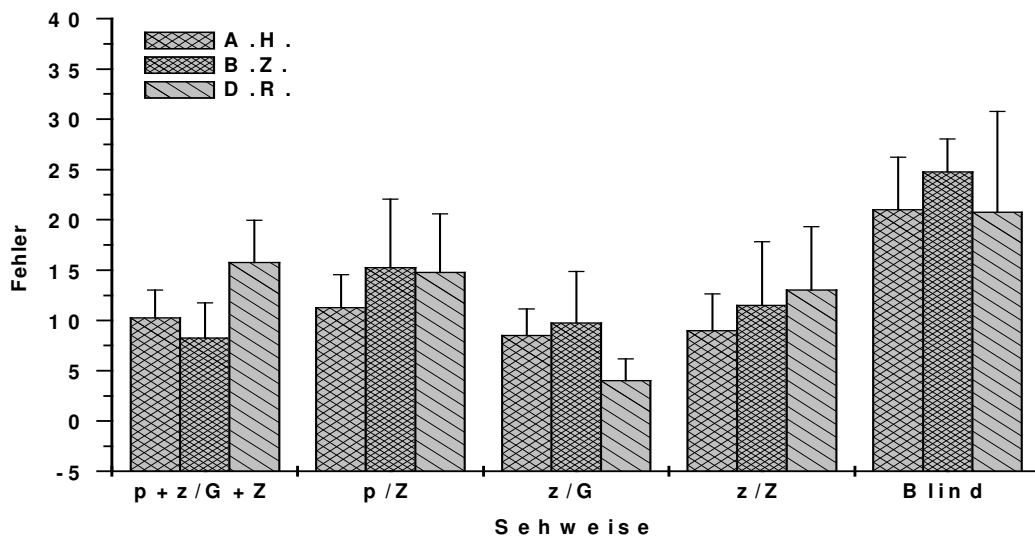


Abbildung 6: Mittlere Fehlerzahl der einzelnen Probanden pro Sehweise

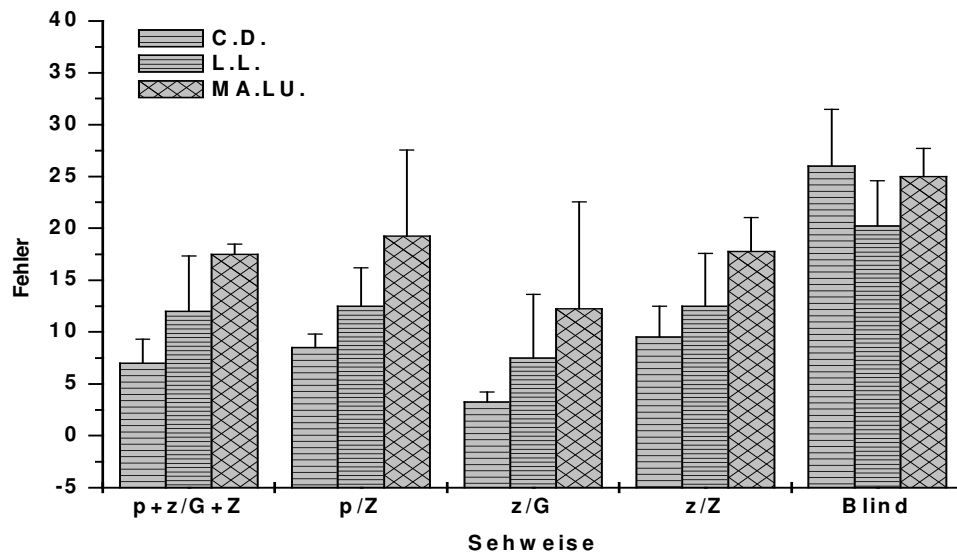
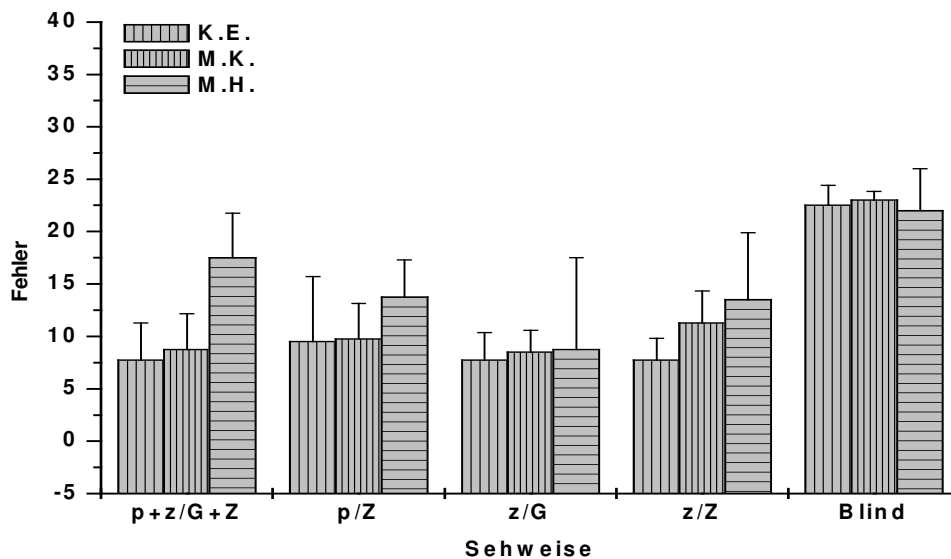


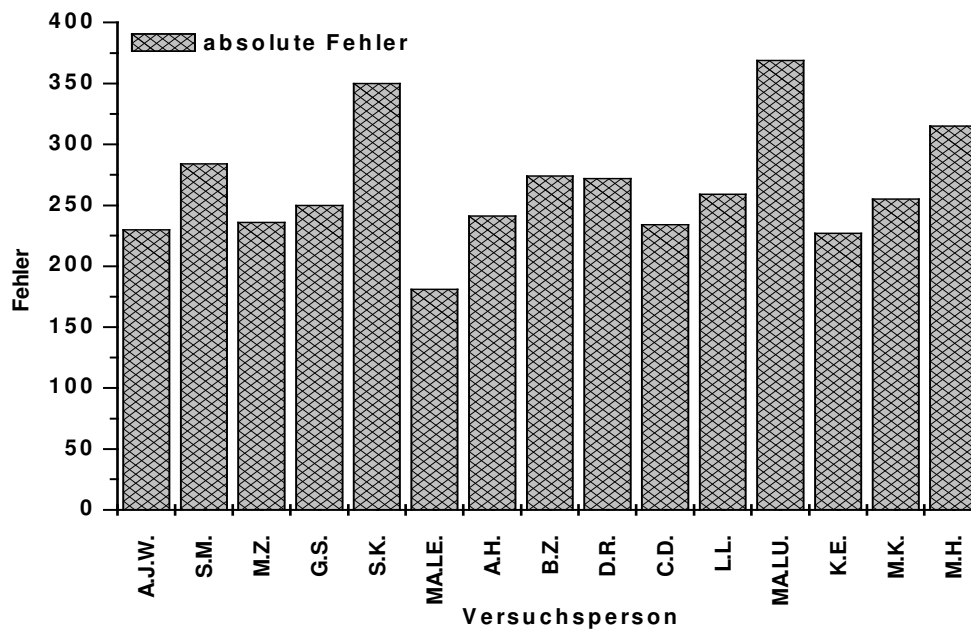
Abbildung 7: Mittlere Fehlerzahl der einzelnen Probanden pro Sehweise



**Abbildung 8: Mittlere Fehlerzahl der einzelnen Probanden pro Sehweise**

- In den einzelnen Sehweisen bewegt sich die Leistung für **peripher + zentral / Gegenwart und Zukunft** zwischen 5,25 Fehlern mit Standardabweichung 2,8 (MA.LE.) und 17,5 mit Standardabweichung 4,2 (M.H.).
- Die zweite periphere Sehweise (**peripher / Zukunft**) zeigt Fehler zwischen 5,75 mit Standardabweichung 1,7 (MA.LE.) und 20,25 Fehler mit Standardabweichung 3,4 (S.K.)
- Die Sehweise mit den insgesamt wenigsten Fehlern (**zentral / Gegenwart**) weist eine Fehlerbreite zwischen 4,0 mit Standardabweichung 2,2 (D.R.) und 12,5 mit Standardabweichung 5,7 (S.K.) auf.
- In der zweiten zentralen Sehweise (**zentral / Zukunft**) liegen die Fehler im Mittel zwischen 8,25 mit Standardabweichung 4,6 (A.J.W.) und 17,75 mit Standardabweichung 3,3 (MA.LU.).
- Im Konrolldurchgang (**Blind**) beträgt die geringste mittlere Fehlerzahl 16,75 mit Standardabweichung 2,2 (MA.LE.), die höchste 26,0 mit Standardabweichung 5,4 (C.D.).

In Abbildung 9 ist die Leistung der einzelnen Probanden mit Darstellung der absoluten Fehlerzahl in allen Sehweisen im Gesamtversuch ablesbar.

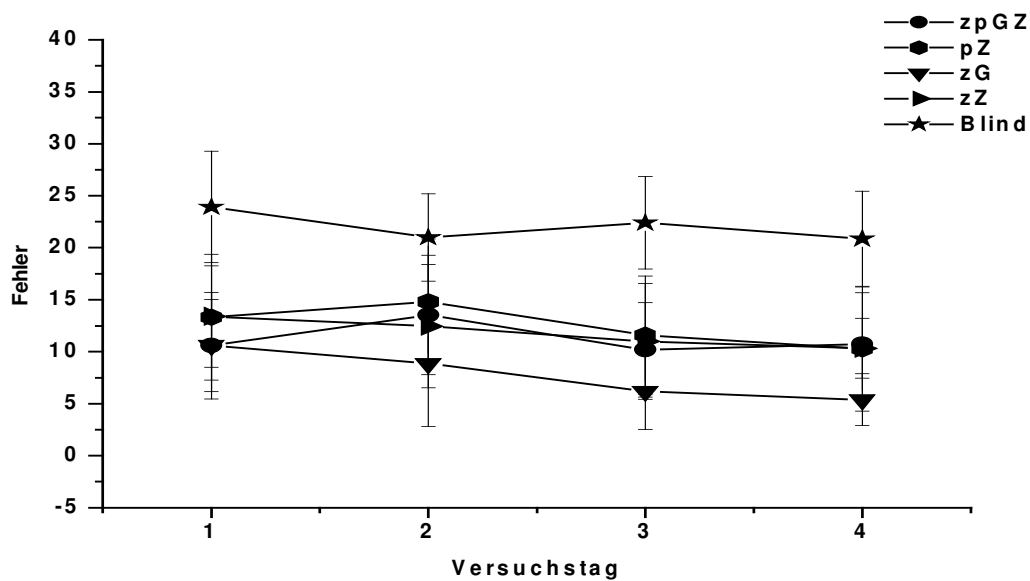


**Abbildung 9: Absolute Fehlerzahl der Probanden (alle Sehweisen) im Versuch**

Proband MA.LE. weist die beste Performance mit 181 Fehlern auf. Die meisten Fehler macht Proband MA.LU. (369 Fehler). Statistisch hat die Versuchsperson als zufälliger Faktor in der Untersuchung keinen signifikanten Einfluss.

In der generellen Betrachtung der Leistung, das heißt der mittleren Fehlerzahl im Versuch, fällt auf, dass diese insgesamt sehr niedrig ist, niedriger als man erwarten würde (maximal 25 Fehler im Mittel in der „nicht sehenden“ Sehweise Blind).

Abbildung 10 zeigt die Entwicklung der Leistung in den einzelnen Sehweisen über die Versuchstage.



**Abbildung 10: Mittlere Fehlerzahl aller Probanden über die Versuchstage für die einzelnen Sehweisen**

- Am deutlichsten ist die Abnahme der Fehlerzahl in der **zentral / Gegenwart-** Sehweise. Die Fehlerspanne zwischen Tag eins und vier liegt bei 5,2 (10,6 mit Standardabweichung 5,1 am Tag eins und 5,4 mit Standardabweichung 2,5 am Tag vier).
- Die zweite zentrale Sehweise, **zentral / Zukunft**, variiert zwischen 13,4 Fehlern mit Standardabweichung 4,9 am Tag eins und 10,3 mit Standardabweichung 2,9 am vierten Tag.
- Vergleicht man hierzu die peripheren Sehweisen, findet sich für **peripher und zentral / Gegenwart und Zukunft** am ersten Versuchstag dieselbe mittlere Fehlerzahl wie für **zentral / Gegenwart** (10,6 Fehler mit Standardabweichung 4,4). Sie nimmt zum letzten Tag nicht ab (10,7 Fehler mit Standardabweichung 4,9).
- Die zweite periphere Sehweise (**peripher / Zukunft**) weist Fehlerzahlen von 13,3 mit Standardabweichung 6,0 (Tag eins) und 10,3 mit Standardabweichung 6,0 (Tag vier) auf.
- Augenfällig bei den beiden peripheren Sehweisen ist der Anstieg der Fehlerzahl am Tag zwei, für **peripher + zentral / Gegenwart +Zukunft** auf 13,2 Fehler in Relation zu 10,6 ( Tag eins) und 10,2 (Tag drei).



- Die **peripher / Zukunft**- Sehweise zeigt eine Sequenz von 13,3 (Tag eins) –14,8 (Tag zwei)-11,6 (Tag drei) Fehlern.
- Die Kontrollsehweise (**Blind**) hat eine Fehlerbreite von 23,9 (Versuchstag eins) und 20,9 (Versuchstag vier) mit der stabilsten Standardabweichung.

Statistisch zeigt der Vergleich der einzelnen Versuchstage folgende signifikante Differenz der Fehler:

Versuchstag eins ist signifikant verschieden zu Tag vier. Ebenso findet sich eine signifikante Differenz zwischen Versuchstag zwei und vier.

### **Tukey-Kramer HSD Effect test (Irrtumswahrscheinlichkeit $\alpha = 0,005$ )**

#### **für den Einflussfaktor Versuchstag auf die Fehlerzahl**

Versuchstag	verschieden zu	Differenz	untere Konfidenzgrenze	obere Konfidenzgrenze
1	Tag 4	3,03	0,99	5,06
2	Tag 4	2,60	0,56	4,64

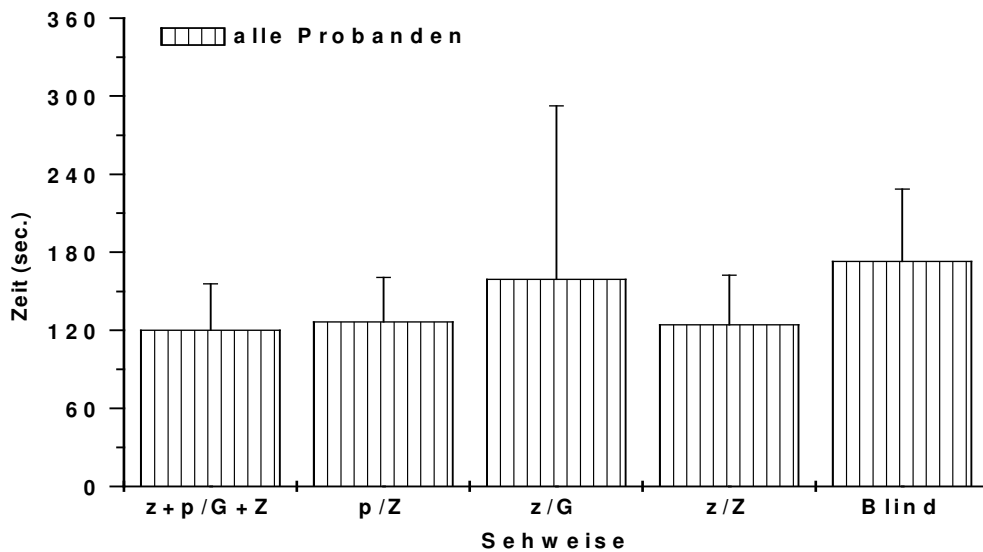
**Tabelle 3: Einflussfaktor Versuchstag**

Kein Unterschied ergibt sich zwischen Tag eins und zwei, zwischen Versuchstag zwei und drei sowie zwischen Tag drei und vier.

### **3.2. Zeit**

Die Darstellung für die in den einzelnen Sehweisen benötigte Zeit erfolgt analog den Fehlerabbildungen als arithmetisches Mittel der Zeit pro Sehweise mit der zugehörigen Standardabweichung. Es sind die Daten von drei Probanden in einer Abbildung zusammengefasst.

In Abbildung 11 ist die insgesamt benötigte Zeit aller Probanden im Mittel für jede Sehweise dargestellt.



**Abbildung 11: Mittlere Zeit aller Probanden pro Sehweise**

- Auffällig ist die Höhe der benötigten Zeit in der **zentral / Gegenwart** - Sehweise im Vergleich zu allen anderen Sehweisen.

Hier brauchen die Versuchspersonen 160 Sekunden (2,7 Minuten) im Mittel für den Weg. Die Streuung der Werte ist hier am höchsten von allen Sehweisen (Standardabweichung von 133,4 Sekunden).

Statistisch unterscheidet sich die Sehweise **zentral / Gegenwart** in der Zeit signifikant von den Sehweisen **zentral + peripher / Gegenwart + Zukunft** sowie von der Sehweise **zentral / Zukunft** in der Zeit. Für die **zentral / Gegenwart** - Sehweise ist (wie in Abbildung 11 ersichtlich) signifikant *mehr* Zeit nötig.

**Tukey-Kramer HSD Effect test (Irrtumswahrscheinlichkeit  $\alpha = 0,005$ )**

**für den Einflussfaktor Sehweise auf die Zeit**

Sehweise	verschieden zu	Differenz	untere Konfidenzgrenze	obere Konfidenzgrenze
z/G	p+z/G+Z	18,88	1,67	36,09
z/G	z/Z	17,75	0,54	34,96

**Tabelle 4: Einflussfaktor Sehweise / Zeit: zentral / Gegenwart**

Alle anderen Sehweisen im Versuch unterscheiden sich in der Zeit *nicht* signifikant voneinander, auch nicht einmal die zentrale von der peripheren in der Zukunft.

- Die zweite zentrale Sehweise (**zentral / Zukunft**) nimmt im Mittel 2,1 Minuten in Anspruch (124,4 Sekunden mit Standardabweichung 38,0 Sekunden).
- Im Vergleich dazu unterscheidet sich die **periphere Sehweise in der Zukunft** mit 126,2 Sekunden und einer Standardabweichung von 34,4 Sekunden fast nicht von ihrem zentralen Pendant.
- Die Sehweise mit **zentralem und peripherem Gesichtsfeld / Gegenwart und Zukunft** beansprucht im Mittel eine Zeit von 120 Sekunden mit einer Standardabweichung von 35,7 Sekunden.
- Deutlich abgehoben ist die **Kontrollbedingung**, für die im Mittel 2,9 Minuten (172,8 Sekunden mit Standardabweichung 55,7 Sekunden) gebraucht werden.

Hier findet sich ein statistisch nachweisbarer Signifikanzunterschied zu allen anderen Sehweisen:

**Tukey-Kramer HSD Effect test (Irrtumswahrscheinlichkeit  $\alpha = 0,005$ )  
für den Einflussfaktor Sehweise auf die Zeit**

Sehweise	verschieden zu	Differenz	untere Konfidenzgrenze	obere Konfidenzgrenze
blind	p+z/G+Z	48,98	31,77	66,19
blind	p/Z	47,07	29,86	64,28
blind	z/G	30,10	12,89	47,31
blind	z/Z	47,85	30,6	65,06

**Tabelle 5: Einflussfaktor Sehweise / Zeit: Blind**

In den Abbildungen 12 - 16 ist die von den einzelnen Probanden benötigte Zeit für die Sehweisen dargestellt.

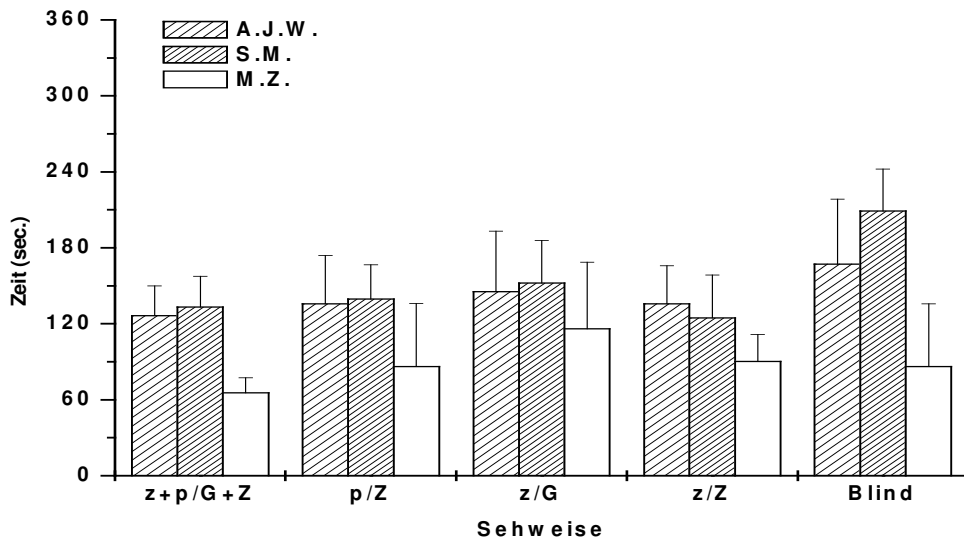


Abbildung 12: Mittlere Zeit der einzelnen Probanden pro Sehweise

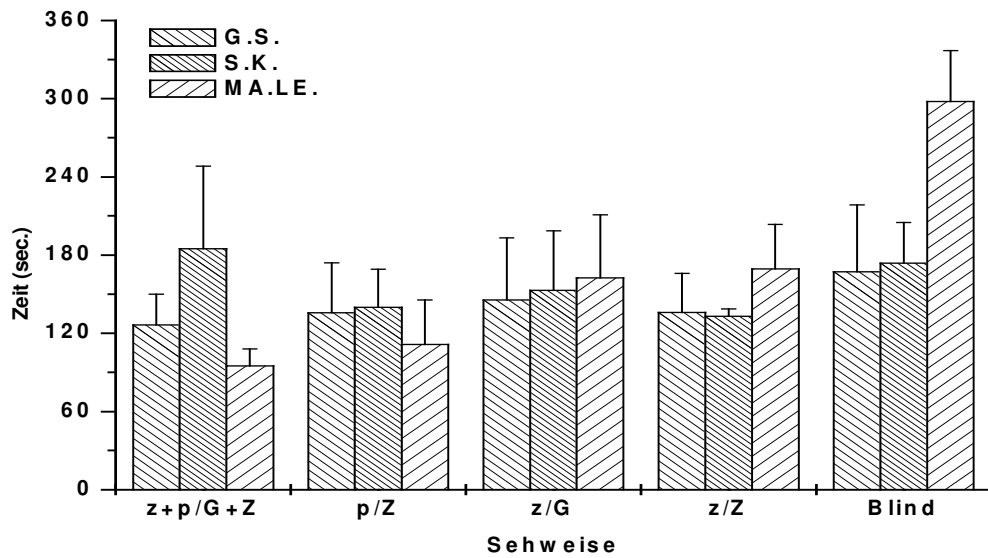


Abbildung 13: Mittlere Zeit der einzelnen Probanden pro Sehweise

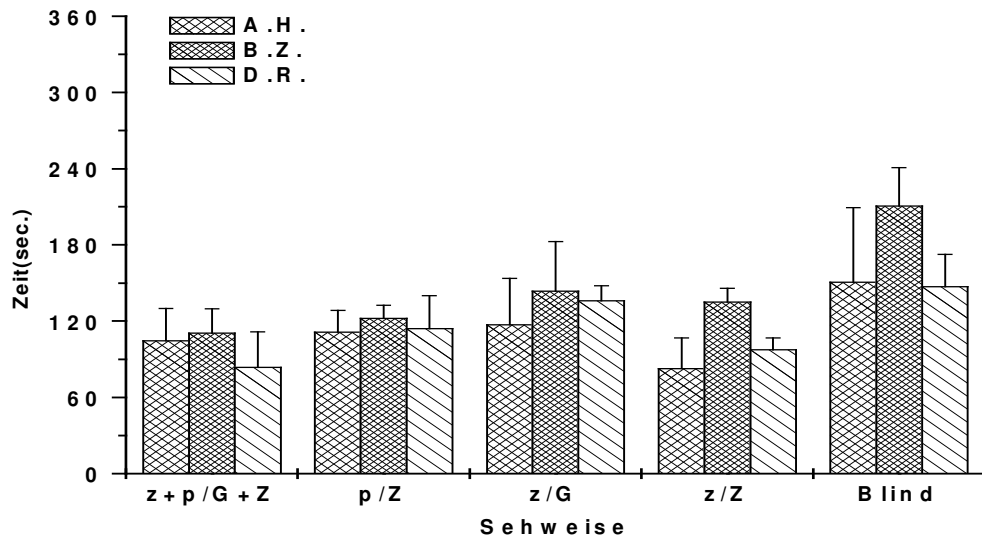


Abbildung 14: Mittlere Zeit der einzelnen Probanden pro Sehweise

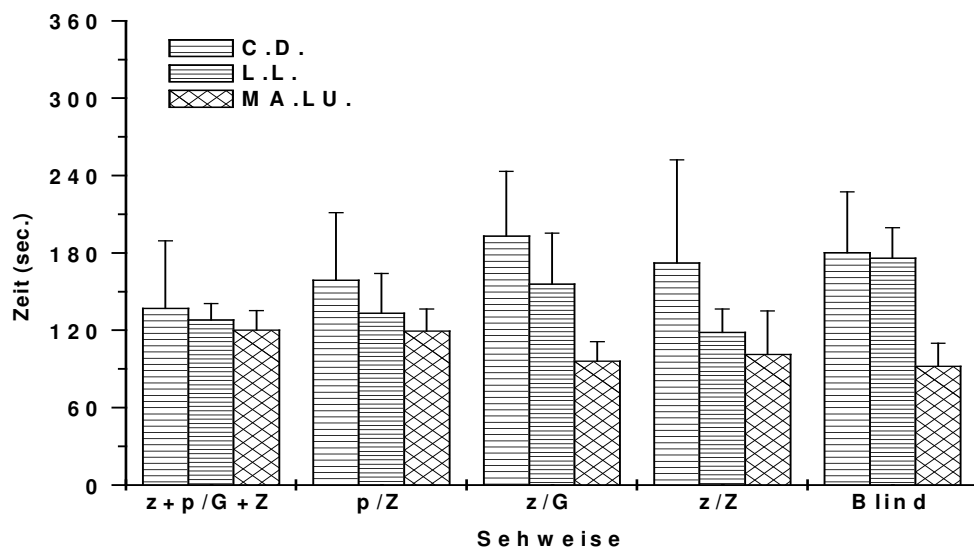
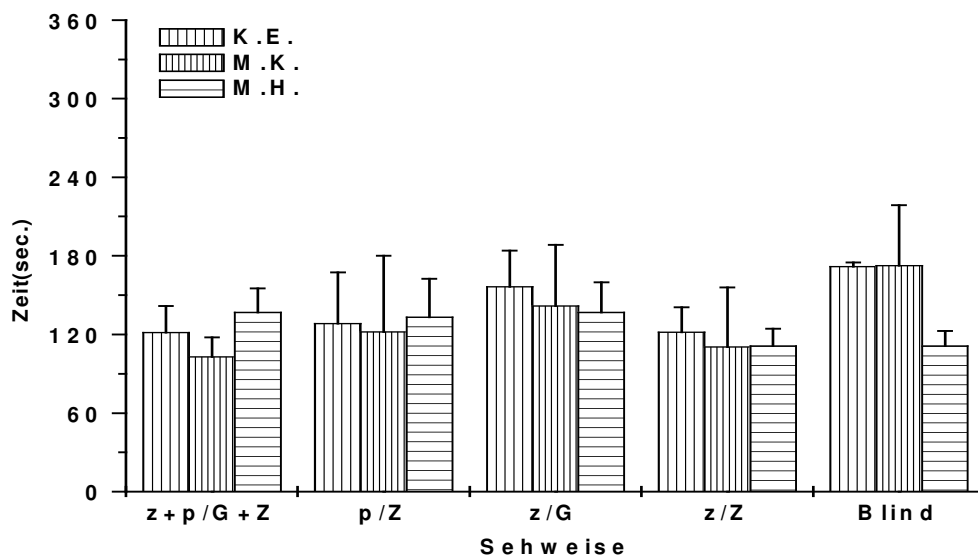


Abbildung 15: Mittlere Zeit der einzelnen Probanden pro Sehweise



**Abbildung 16: Mittlere Zeit der einzelnen Probanden pro Sehweise**

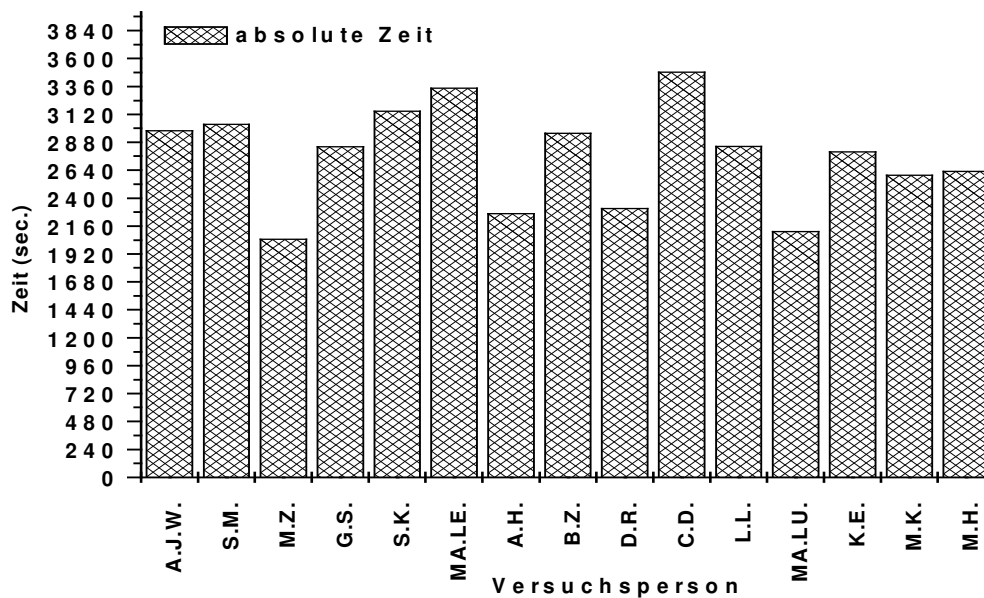
Interessant ist der Vergleich der Zeit einzelner Versuchsteilnehmer für die jeweiligen Sehweisen im Versuch:

- Bei der Sehweise **zentral + peripher / Gegenwart + Zukunft** reicht die benötigte Zeit von 65,5 Sekunden mit Standardabweichung 12,0 Sekunden (M.Z.) bis 184,5 Sekunden mit Standardabweichung 63,6 Sekunden (S.K.).
- Die **peripher / Zukunft** – Sehweise erfordert Zeiten von 86,3 Sekunden mit Standardabweichung 50,0 Sekunden (M.Z.) bis 158,8 Sekunden mit Standardabweichung 52,4 Sekunden (C.D.).
- Dazu vergleichsweise lang sind die Zeiten für die **zentral / Gegenwart**-Sehweise. Hier zeigt sich ein Spanne zwischen 96,0 Sekunden mit Standardabweichung 15,2 Sekunden (MA.LU.) bis 193,0 Sekunden mit Standardabweichung 52,4 Sekunden (C.D.).
- Für die zweite **zentrale Sehweise, in der Zukunft**, liegen die mittleren Zeiten zwischen 82,8 Sekunden mit Standardabweichung 24,0 Sekunden (A.H.) und 172,3 Sekunden mit Standardabweichung 79,9 Sekunden (C.D.).
- **Blind**, in der Kontrollbedingung, liegt die minimal benötigte Zeit bei 1,5 Minuten, (92,0 Sekunden mit Standardabweichung 18,0 Sekunden, MA.LU.). Die maximale Zeit liegt bei fünf Minuten (297,8 Sekunden mit Standardabweichung 39,0 Sekunden MA.LE).

Statistisch lässt sich kein signifikanter Einfluss des zufälligen Faktors Versuchsperson auf die Zeit errechnen.

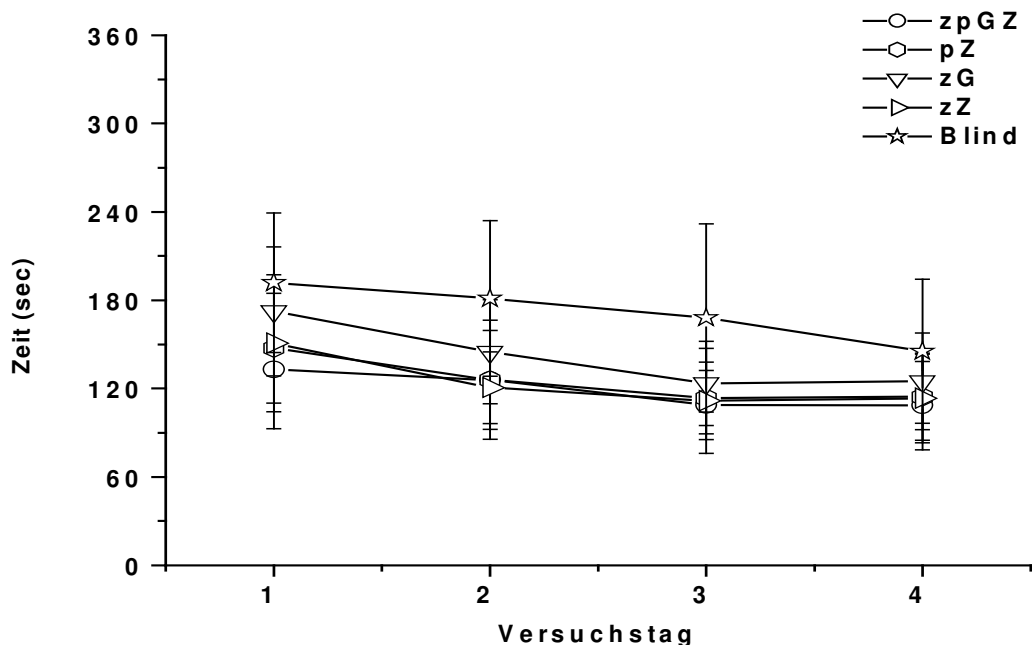
Abbildung 17 weist im Säulendiagramm der im Versuch benötigten absoluten Zeit (in Sekunden) den Probanden M.Z. als den schnellsten mit einer Gesamtzeit von 34,2 Minuten (2047 Sekunden) aus, dicht gefolgt von MA.LU. mit einer Zeit von 35,2 Minuten (2114 Sekunden).

Langsamster Teilnehmer ist C.D. mit annähernd der doppelten Zeit von 58,0 Minuten (3482 Sekunden). An zweitletzter Stelle folgt MA.LE. mit 55,8 Minuten (3345 Sekunden).



**Abbildung 17: Absolute Zeit der Probanden ( alle Sehweisen ) im Versuch**

Die Gesamtzeit aller Probanden über die Versuchstage ist für die einzelnen Sehweisen in Abbildung 18 dargestellt.



**Abbildung 18: Mittlere Fehlerzahl aller Probanden über die Versuchstage für die einzelnen Sehweisen**

Sichtbar ist die Abnahme der benötigten Zeit zwischen Tag eins und vier über die Versuchstage.

- Der Zeitunterschied von Tag eins zu Tag vier mit der **zentral / Gegenwart** - Sehweise beträgt 38 Sekunden (151 und 113 Sekunden).
- Das Intervall für die Sehweise **zentral + peripher / Gegenwart +Zukunft** liegt bei 24 Sekunden, 133 sec. am Tag eins und 109 Sekunden am Tag vier. (Dieser ist von allen Sehweisen der geringste Unterschied).
- Sehen die Probanden **zentral in der Zukunft**, benötigen sie am ersten Versuchstag 2,9 Minuten (172,5 Sekunden), am Tag vier nur noch 2,1 Minuten (125 Sekunden). Hier ist die Spanne zwischen dem ersten und letzten Tag innerhalb der „sehenden“ Sehweisen mit 47 Sekunden am höchsten.
- In der Kontrolle (**Blind**) ist die Zeit erwartungsgemäß hoch, 192 Sekunden am Tag eins und 145 Sekunden am Tag vier.

Statistisch ist die Gesamtzeit zwischen den Versuchstagen eins, zwei und drei signifikant verschieden. Sie nehmen in signifikantem Ausmaß ab. Keine signifikante Unterscheidbarkeit findet sich zwischen Versuchstag drei und vier.



### 3.3. Fehler und Zeit

Die Frage stellt sich, ob eine Korrelation zwischen benötigter Zeit und der Leistung, das heißt der Fehlerzahl besteht.

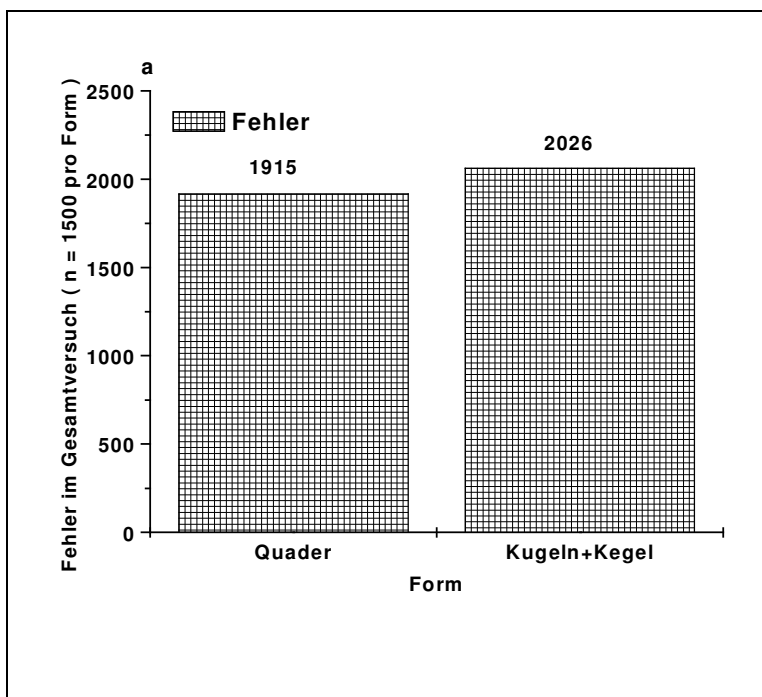
Es lässt sich eine Korrelation von Zeit und Fehlern lediglich in der Sehweise **peripher / Zukunft** finden. Diese ist positiv, das heißt, je mehr Zeit die Freiwilligen benötigen, desto höher ist die Fehlerzahl. Alle anderen Sehweisen zeigen keine signifikante Korrelation zwischen Fehlern und Zeit. Auch dieses Phänomen wird in der Diskussion zu betrachten sein.

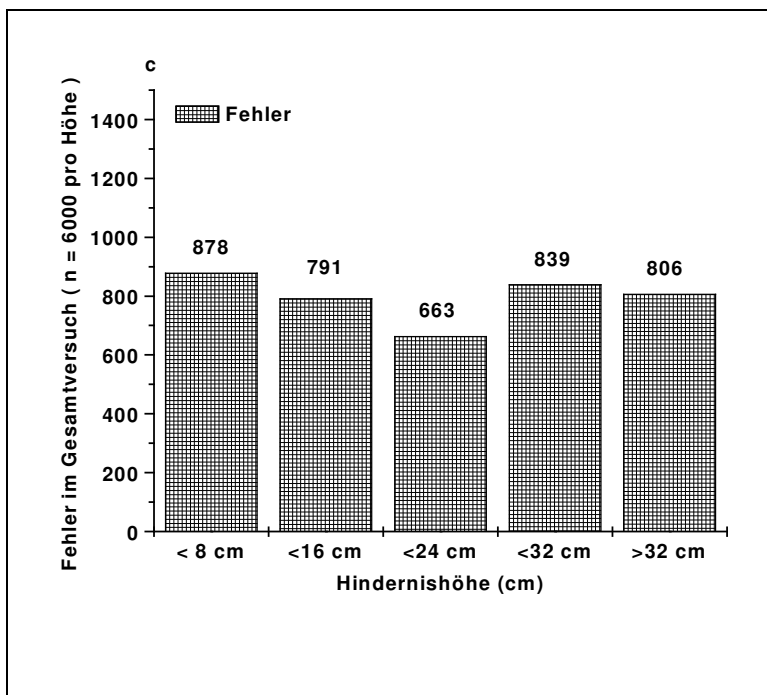
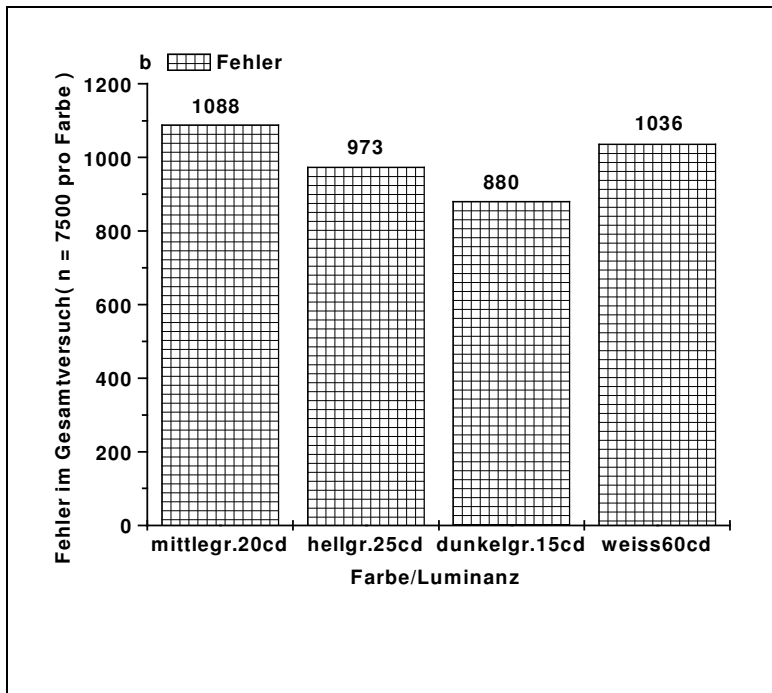
Mittelwert	Standardabw.	Korrelation	Signifikanz	Anzahl
Fehler: 13,13	6,67	0,339	0,0081	60
Zeit: 125,73	34,51	-	-	-

**Tabelle 5: Korrelation von Zeit und Fehler: Sehweise peripher / Zukunft**

### 3.4. Fehler an Hindernissen

In Abbildung 19 a-c ist die Zahl der Fehler abhängig von den Hinderniseigenschaften dargestellt.





**Abbildung 19 a - c: Fehler im Parcours**  
**a: pro Form b: pro Farbe c: pro Höhenklasse**

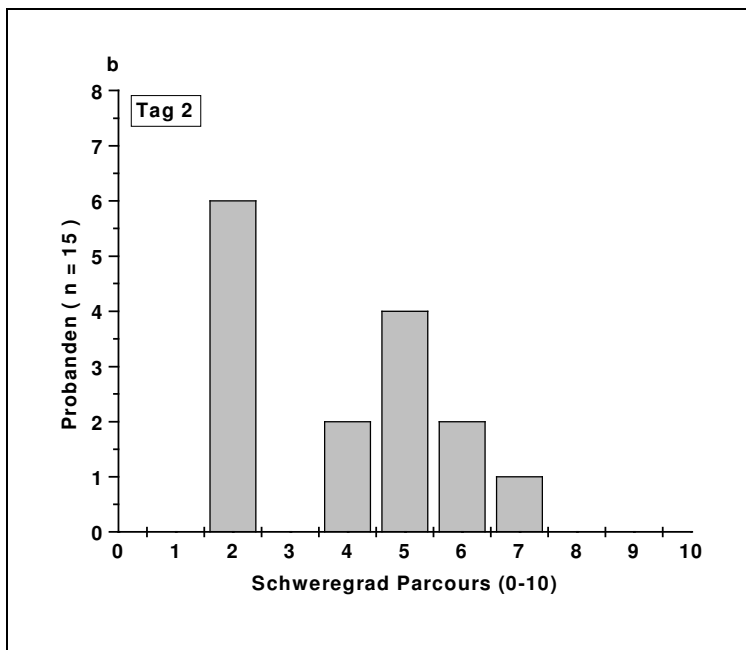
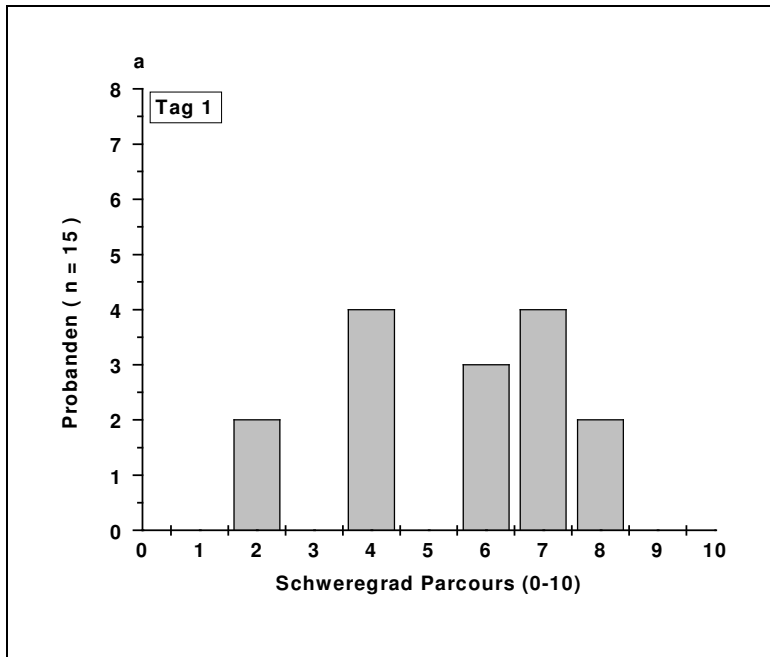
Auf eine statistische Berechnung wird verzichtet, die Darstellung erfolgt nur grafisch. Die Form beeinflusst die Fehlerzahl nicht, was einem erwarteten Ergebnis entspricht. Bezüglich der Luminanzabhängigkeit (Abbildung 19 b) treten die meisten Fehler bei Hindernissen mit der geringsten Leuchtdichtedifferenz zum Untergrund (mittelgrau) auf. Dass die weißen Hindernisse an zweiter Stelle, noch vor den wesentlich schlechter sichtbaren hellgrauen Bausteinen rangieren, entspricht nicht der Erwartung. Betrachtet man die Fehlerzahl in Abhängigkeit von der Höhe der Hindernisse, ist die Häufigkeit von Fehlern in der kleinsten Höhenklasse am höchsten. Warum die Fehlerzahl jedoch nicht mit zunehmender Hindernishöhe abnimmt, bleibt ungeklärt.

### **3.5. Ergebnisse der Fragebögen**

#### **3.5.1. Fragen zur Einschätzung des Schweregrads des Parcours**

Am Ende jedes Versuchstags werden die Probanden gebeten, einen Fragebogen auszufüllen. Damit beurteilen die Teilnehmer die Sehweisen und das Setting des Versuchstags nach ihrem subjektiven Empfinden.

Abbildung 20 a-d stellt die subjektiv empfundene Schwierigkeit des Parcours an jedem Tag auf einer Skala zwischen 0 (= überhaupt nicht schwierig) und 10 (= extrem schwierig) dar.



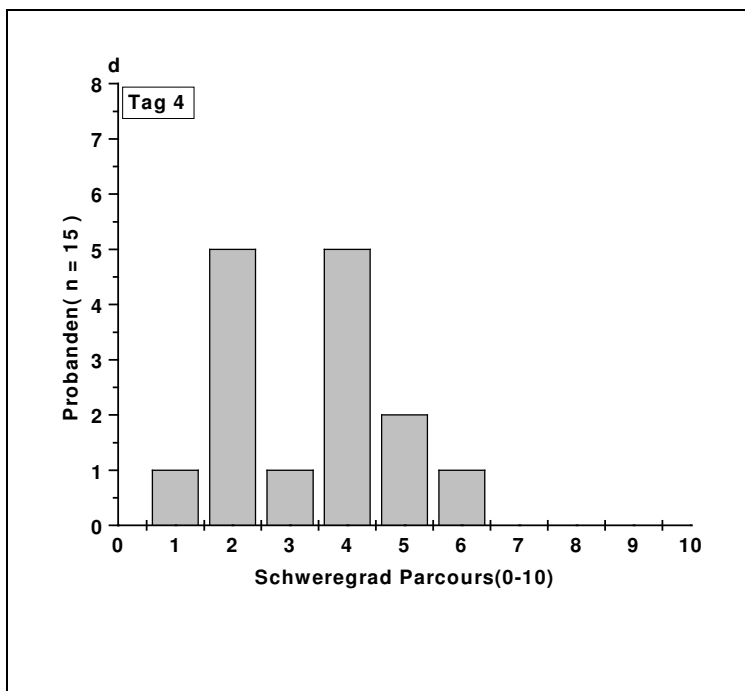
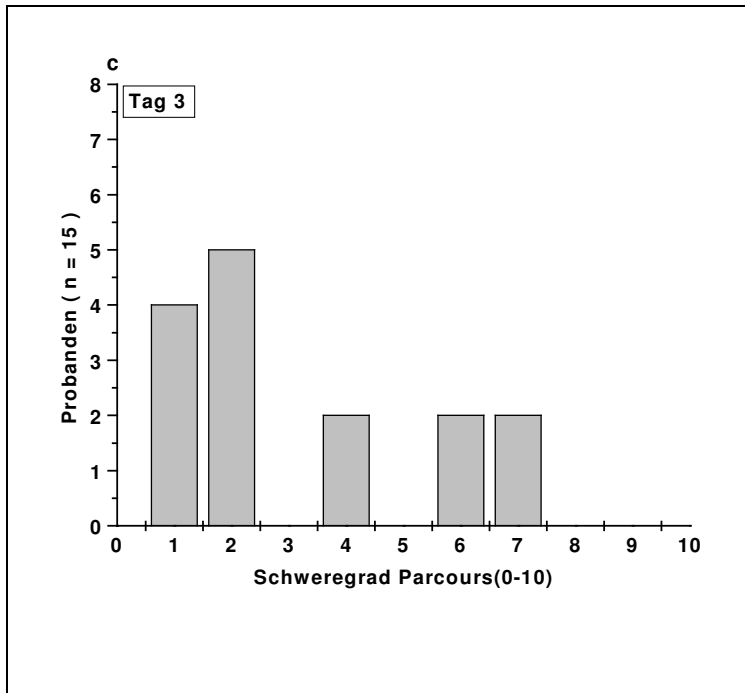


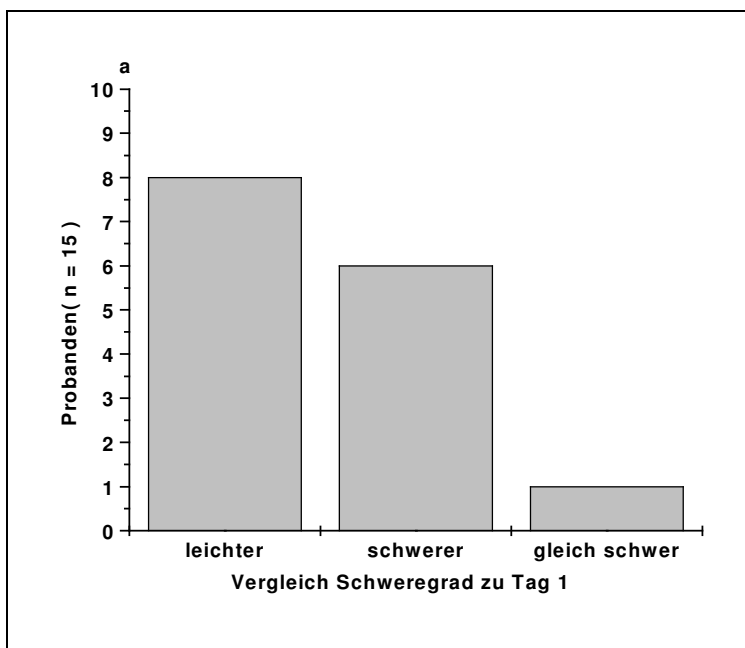
Abbildung 20 a – d: Subjektive Bewertung des Schweregrads des Parcours

## 42 Ergebnisse

---

Dabei liegt die Mehrzahl der Einschätzungen anfangs im höheren Bereich. Am Ende ist eine Verschiebung zu geringeren Schweregraden zu erkennen. Es ist die zentrale Tendenz deutlich.

Abbildung 21 a - c zeigt die Antworten auf die Frage, wie der Parcours bezüglich des Schweregrades im Vergleich zum vorherigen Versuchstag eingeschätzt wird (leichter, schwerer oder gleich schwer).



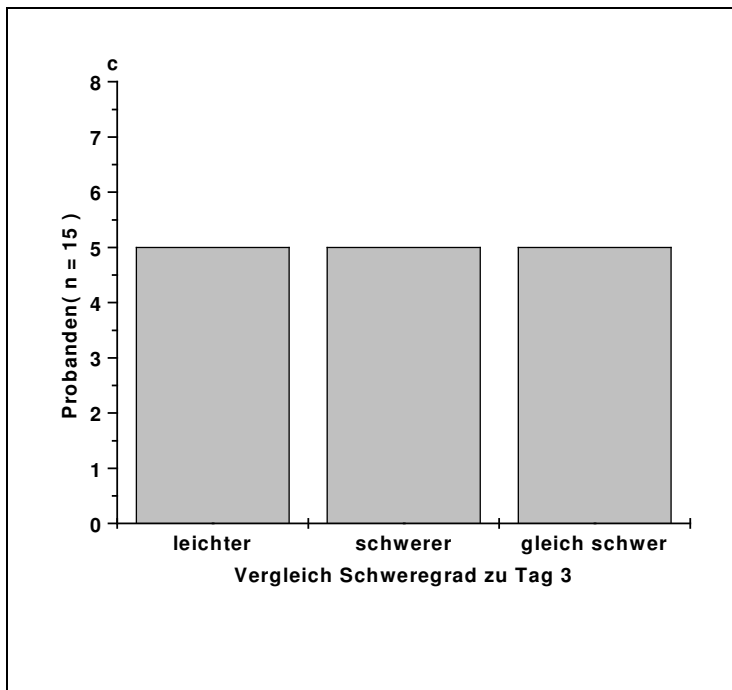
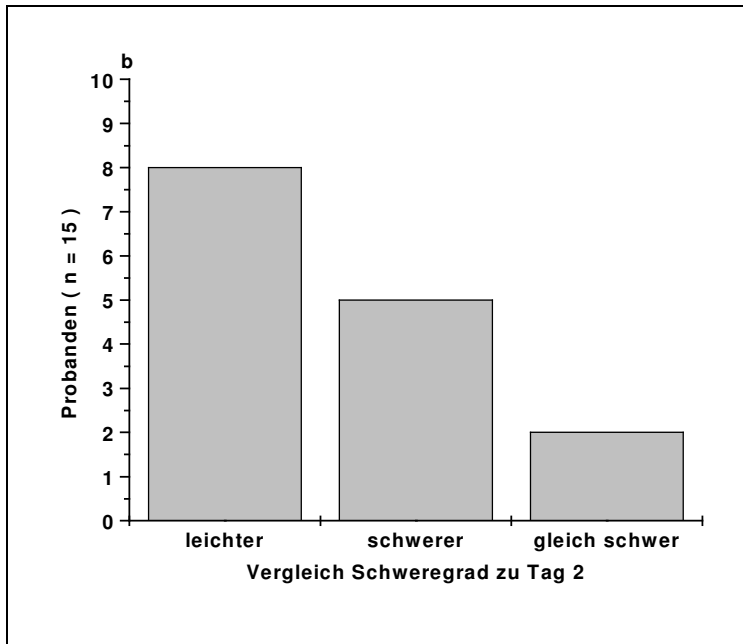


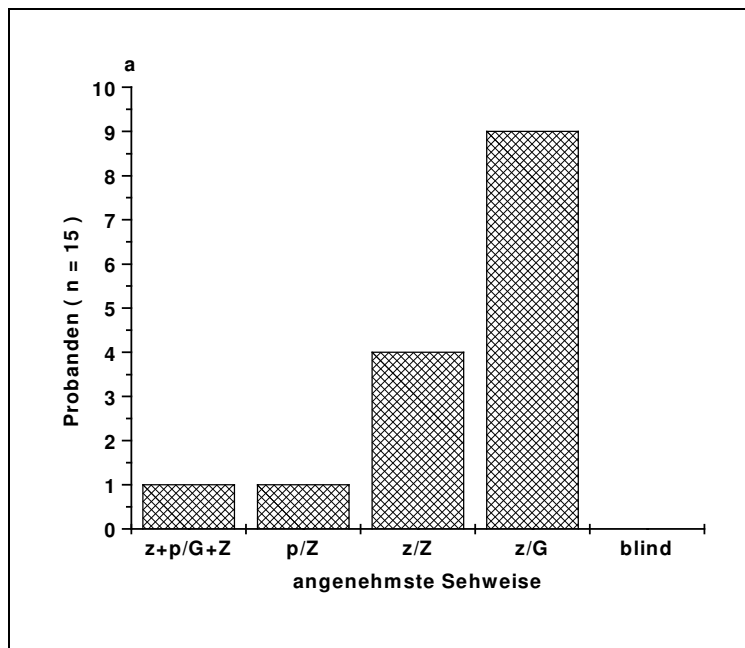
Abbildung 21 a – c: Einschätzung des Schweregrads im Vergleich zum Vortag

Auf die Frage nach Gründen, warum die Einschätzung so erfolgt, ist die Mehrzahl der Statements: „Leichter“, „Gewöhnung“, „Übung“. Einmal „mehr gesehen“ und „nicht so zugestellt.“ Lautet die Antwort jedoch „schwerer“, ist die Begründung dafür in drei Fällen: „Parcours länger“, zwei Teilnehmer vermuten „größere beziehungsweise „kleinere Hindernisse“. „Anderer Aufbau“ ist eine Antwort.

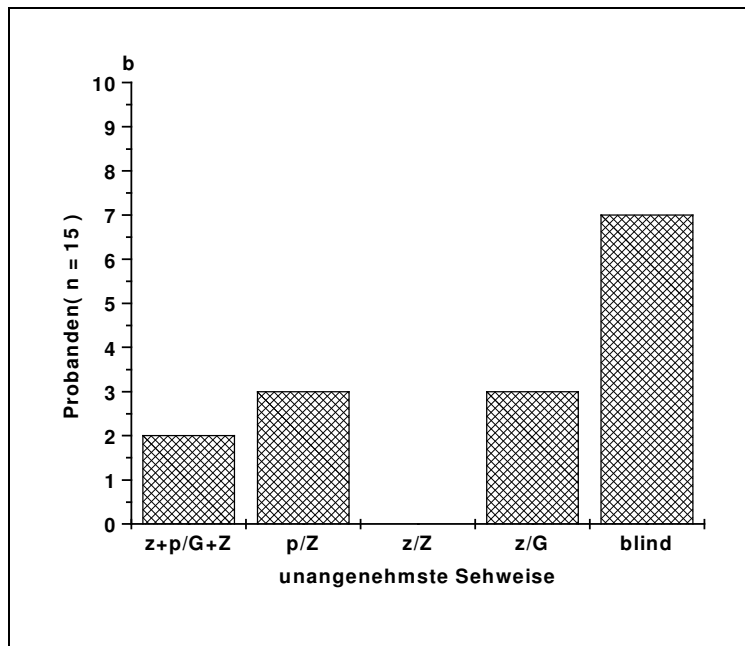
### 3.5.2. Fragen zu den einzelnen Sehweisen

Neben dem statistisch errechneten Signifikanzunterschied in der Sehweise zentral / Gegenwart ist die subjektive Einschätzung der Versuchsteilnehmer hinsichtlich der Sehweisen von Bedeutung.

Abbildung 22 a und b zeigen die für die Probanden angenehmste und unangenehmste Sehweise.







**Abbildung 22 a + b: Subjektiv angenehmste und unangenehmste Sehweise**

Wie aus Abbildung 22 a hervorgeht, bevorzugen neun von fünfzehn Probanden die **zentral / Gegenwart**-Sehweise. Die Begründung lautet, hier sei die Sicht am besten, vor allem für kleine Hindernisse. Vier Probanden, die die **zentral / Zukunft - Sehweise** favorisieren, geben an, hier am meisten zu sehen, vor allem größere Hindernisse.

B.Z. gibt die **periphere Sehweise in der Zukunft** als die angenehmste an. Dabei sei „am wenigsten Konzentration erforderlich“. Für MA.LE. ist die **peripher + zentral / Gegenwart +Zukunft** - Sehweise die bevorzugte, da „das Gesichtsfeld am wenigsten eingeschränkt“ ist.

In Abbildung 22 b stellt sich erwartungsgemäß die Kontrollsehweise **Blind** (auf Grund der damit verbundenen Orientierungs- und Hilflosigkeit) als die unangenehmste dar. Drei Probanden geben die **zentral / Gegenwart**-Sehweise als unangenehm an. Die Gründe sind: „Sicht am meisten eingeschränkt“, „Sehen unsicher“ und „nicht Gewinn bringend, da sowieso unscharf“.

Die Sehweise **peripher + zentral / Gegenwart +Zukunft** ist für zwei Teilnehmer unangenehm, da „am meisten Konzentration erforderlich“ ist. Bei der **Peripherie in der Zukunft** lautet die Begründung: „Kleinstes Sichtfeld“, beziehungsweise „keine Sicht geradeaus“.

### 3.5.2.1. Subjektiver Vergleich einzelner Sehweisen

Der Vergleich von peripherem und zentralem Sehen fällt auch subjektiv mehrheitlich zu Gunsten des zentralen Gesichtsfelds aus.

10 von 15 Probanden bevorzugen die Benutzung des **Zentrums in der Gegenwart** im Vergleich zu **zentral + peripher / Gegenwart + Zukunft**. Sie geben an, hier „scharf“ zu sehen und „direkter“ zu sehen. Die fünf anderen wählen die letztgenannte Sehweise aus, da sie „intuitiver“ und „indirekter“ sehen.

Nach der Präferenz zwischen **peripherem und zentralem Sehen in der Zukunft** befragt, wählen elf Versuchspersonen den zentralen Ausschnitt als angenehmer aus. Hier sehen sie „besser“ und „mehr“. Vier Probanden, die sich beim Einsatz der Peripherie in der Zukunft wohler fühlen, geben an, sich weniger konzentrieren zu müssen sowie einen klareren Ausschnitt, beziehungsweise „gezielter trotz unschärfer“ zu sehen.

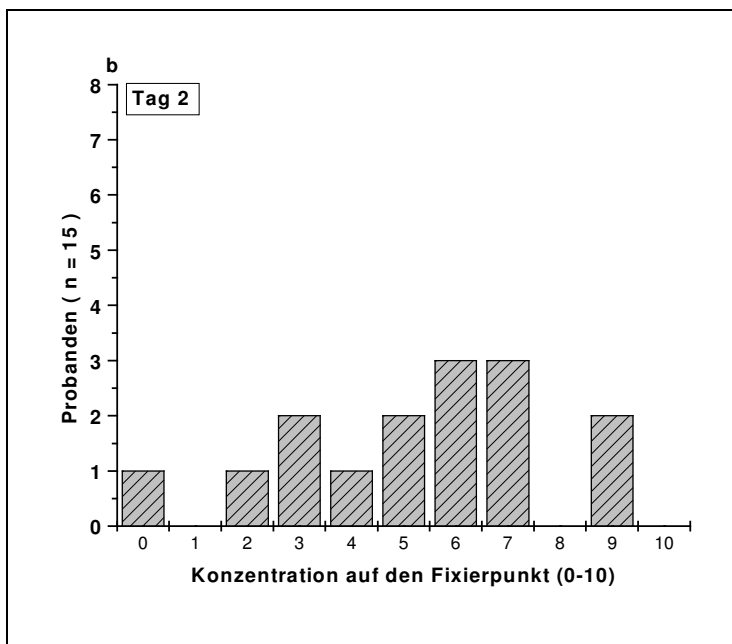
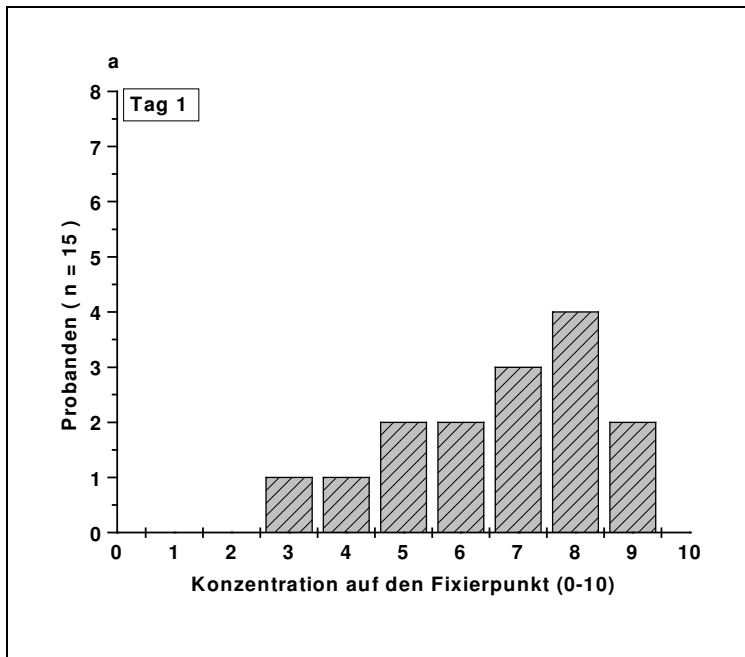
In der Gegenüberstellung der beiden zentralen Sehweisen **zentral / Gegenwart und zentral / Zukunft** wählen 10 von 15 Probanden die **zentral / Gegenwart** - Sehweise als die angenehmere. Die Mehrheit begründet dies mit dem „direkten Blick vor die Füße“ beziehungsweise „auf die Hindernisse“. Diejenigen, die die **zentrale Sehweise in der Zukunft** wählen, geben an, damit „mehr“ zu sehen, „einen größeren Ausschnitt“ zu sehen.

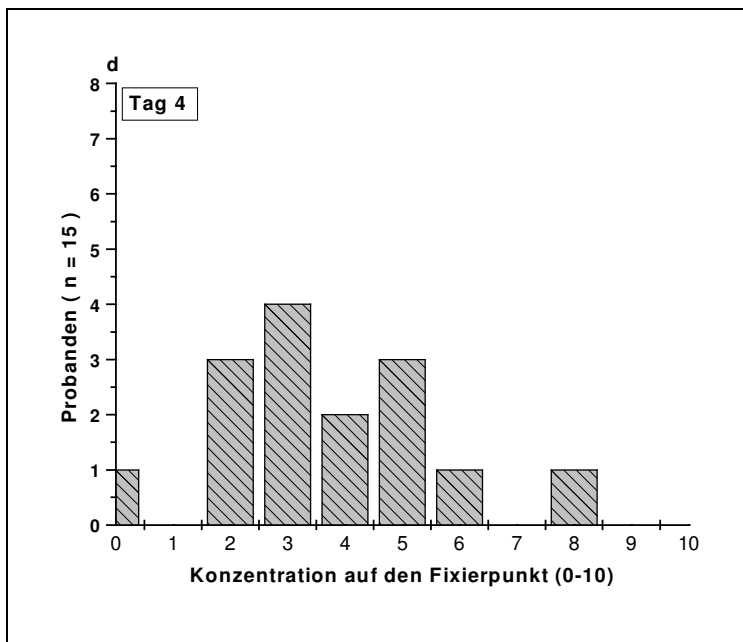
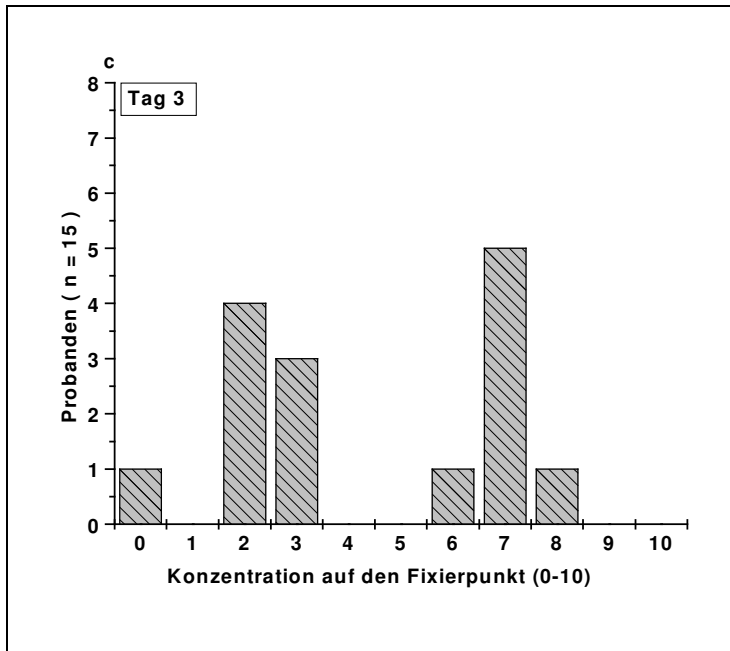
Werden die beiden **Sehweisen** mit **peripherer** Beteiligung zur Wahl gestellt, fällt diese zu Gunsten **der peripher + zentral / Gegenwart + Zukunft** – Sehweise (im Vergleich zu peripher / Zukunft) aus. 10 Freiwillige begründen es mit der weniger eingeschränkten Sicht mit dem kleinen Fixierpunkt. Die fünf anderen Probanden sehen mit der **Peripherie in der Zukunft** „mehr“, es wird „weniger Konzentration“ benötigt.

Die Konzentration auf den Fixierpunkt ist für die Untersuchung in mehrfacher Hinsicht von Bedeutung. Zum Einen für die Frage der Compliance, zum Anderen für die visuelle Aufmerksamkeit.

### 3.5.2.2. Konzentration auf den Fixierpunkt

Abbildung 23 a - d stellt die subjektiv aufgewendete Konzentrationsleistung für die **zentral + peripher / Gegenwart +Zukunft**- Sehweise über die Versuchstage dar.





**Abbildung 23 a-d: Subjektives Ausmaß der Konzentration auf den Fixierpunkt (Schweise peripher + zen tral / Gegenwart + Zukunft)**

Hier sieht man die Verschiebung der Aufmerksamkeit / Konzentration von anfangs hohen Werten zu niedrigeren am Ende des Gesamtversuchs.

### 3.5.3. Zeichnungen

Am Ende jedes Versuchstages werden die Teilnehmer gebeten, den Parcours auf einer DIN A 4 Seite aufzuzeichnen.

Die Abbildungen 24 - 26 zeigen die Ergebnisse. Repräsentativ werden drei „Prototypen“ ausgewählt. In den am wenigsten detaillierten Bildern (wie S.K, Abbildung 24) sind häufig nur die Rampen ohne einzelne Hindernisse wiedergegeben. In der „nächsten Stufe“ finden sich zusätzlich wenig spezifizierete Objekte, meist gleichförmiger Gestalt (zum Beispiel bei MA.LU., Abbildung 25).

Proband G.S. liefert die genaueste Wiedergabe mit unterschiedlich geformten Hindernissen in gut geschätzter Position (siehe Abbildung 26). Ähnlich präzise Zeichnungen finden sich nur bei Proband MA.LE. Die parallele Abbildung der Zeichnungen von Versuchstag eins und vier verdeutlicht, dass sich die Zeichnungen im Verlauf der Untersuchung weder qualitativ noch quantitativ wesentlich verändern. Vier Probanden (L.L, A.H., C.D. und B.Z.) geben an, keine Zeichnung anfertigen zu können, mit der Begründung „schon wieder vergessen“, „zu schwierig“ oder „zu chaotisch“. In der Diskussion der Ergebnisse wird darauf zurückzukommen sein, da hier wichtige Hinweise für den Einsatz der Aufmerksamkeit und des visuellen Gedächtnisses beinhaltet sein könnten.

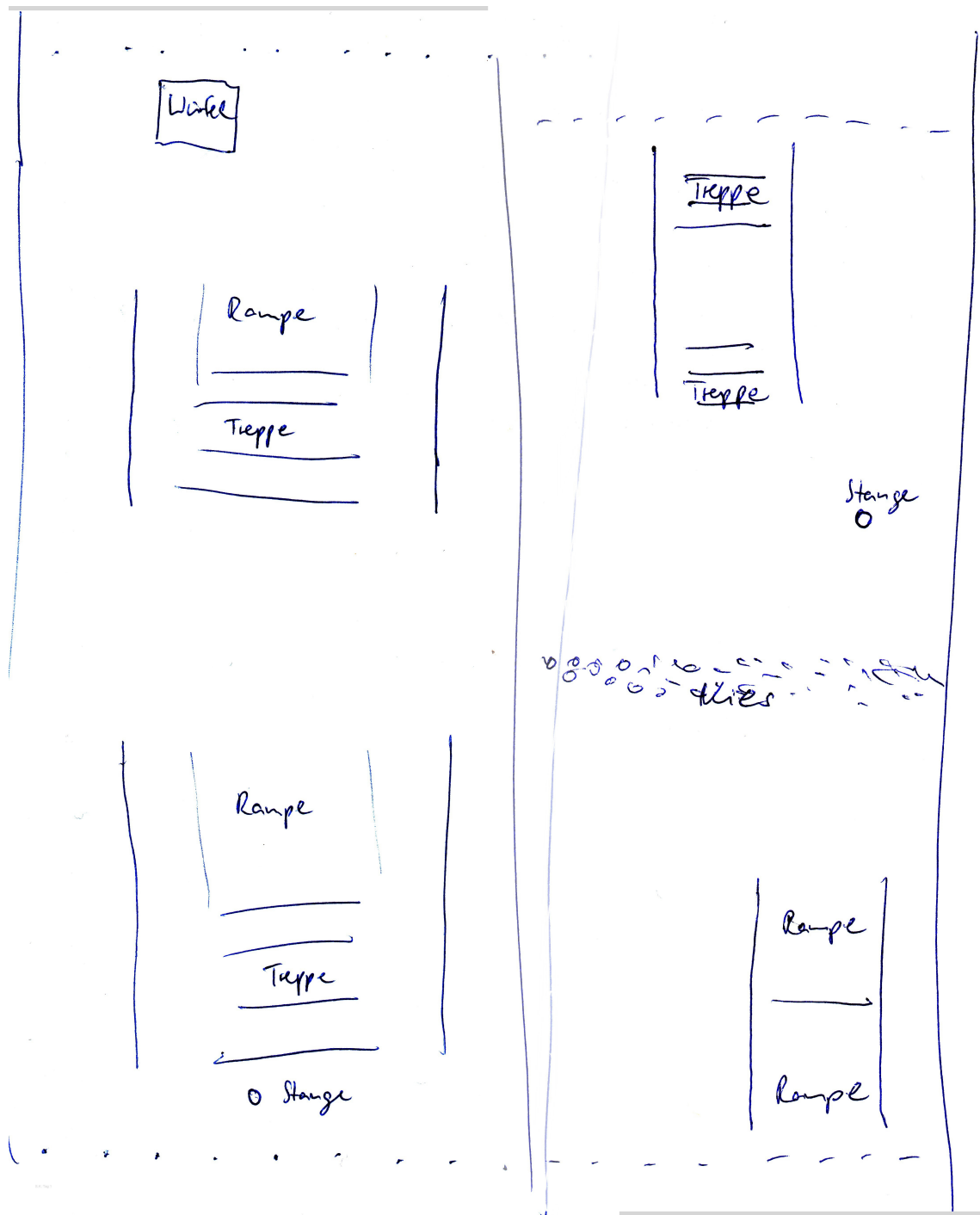


Abbildung 24: Zeichnung Proband S.K. links: Versuchstag 1

rechts: Versuchstag 4



Abbildung 25: Zeichnung Proband MA.LE.

links: Versuchstag 1

rechts: Versuchstag 4

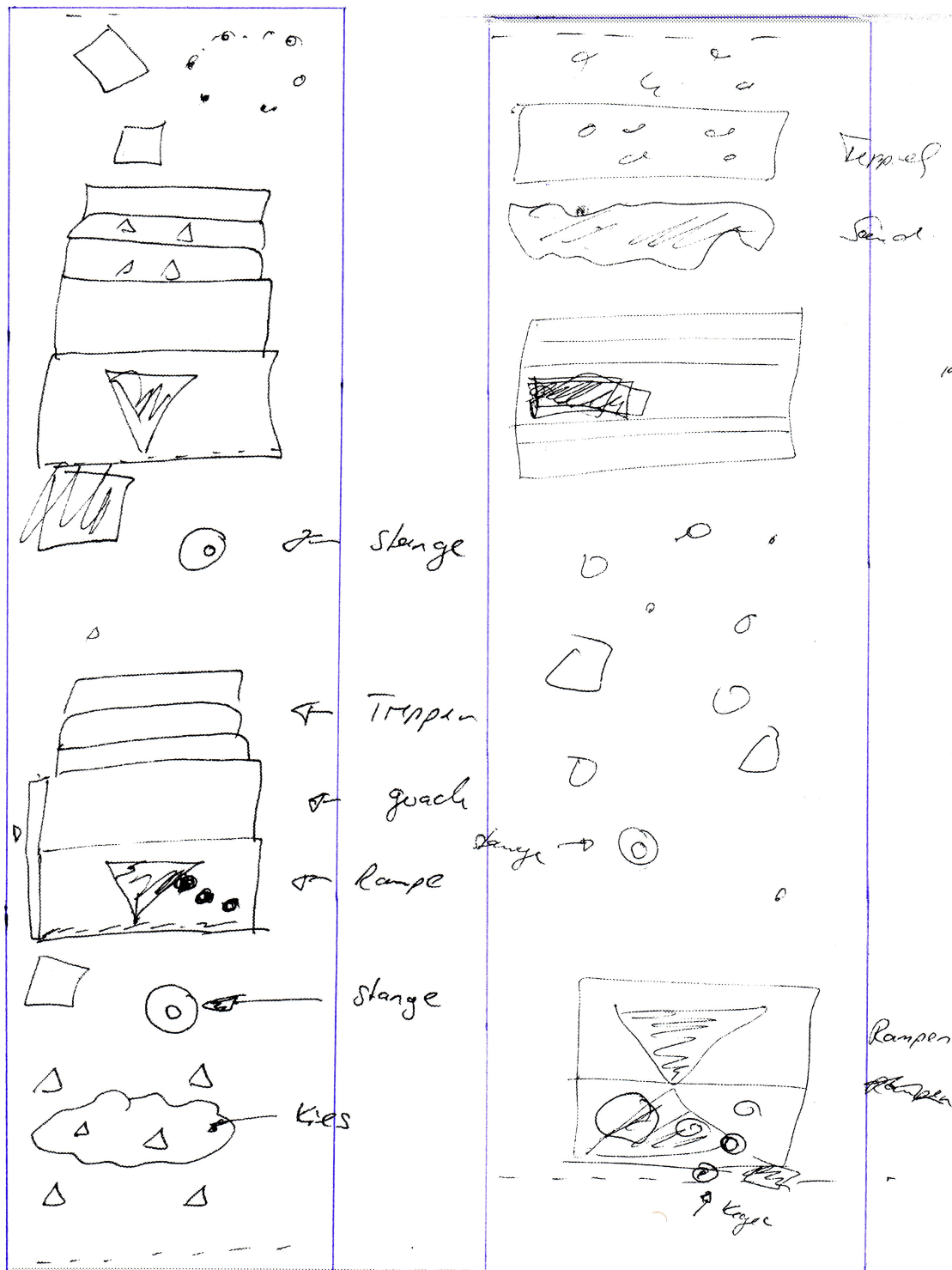


Abbildung 26: Zeichnung Proband G.S. links: Versuchstag 1

rechts: Versuchstag 4



### 3.6. Zusammenfassung der Ergebnisse

Die mit diesem Experiment zu untersuchende Hypothese, dass das periphere Gesichtsfeld für die Orientierung beim Nachtsehen besser geeignet ist als das zentrale Gesichtsfeld, kann in dieser Arbeit nicht belegt werden.

Das Gegenteil zeigt sich statistisch erwiesen. Unter den hier gegebenen Untersuchungsbedingungen ist das zentrale Gesichtsfeld signifikant besser zur Bewältigung eines Weges bei Nachtbeleuchtung geeignet als das periphere Gesichtsfeld.

Dies gilt im Vergleich der hier eingesetzten zentralen Sehweise in der Gegenwart zu den erprobten peripheren Sehweisen.

Bezieht man die für die einzelnen Sehweisen benötigte Zeit zur Wegbewältigung in die Betrachtung mit ein, so fällt auf, dass eben die signifikant weniger Fehler erzeugende Sehweise (zentral / Gegenwart) signifikant mehr Zeit benötigt als die Sehweise peripher und zentral / Gegenwart + Zukunft und auch die zentrale Sehweise in der Zukunft.

Interessant ist die Tatsache, dass mit der zentralen Sehweise in der Zukunft die Fehlerzahl ansteigt, je mehr Zeit die Probanden benötigen (positive Korrelation von Fehler und Zeit bei dieser Art zu sehen.) Erwartungsgemäß ist die Kontrollbedingung signifikant verschieden zu den anderen Sehweisen.

Über den gesamten Untersuchungsverlauf mit den vier Versuchstagen lässt sich sagen, dass zwischen Tag eins und vier sowie zwischen Tag zwei und vier die Fehlerzahl signifikant abnimmt, hier besteht möglicherweise ein Lerneffekt durch Übung.

Bezüglich der Zeit unterscheiden sich die Versuchstage eins bis drei signifikant voneinander, zum letzten Versuchstag besteht kein Signifikanzunterschied.

Die Ergebnisse der Fragebögen ergeben für die Mehrzahl der Probanden eine subjektive Bevorzugung der zentralen gegenüber den peripheren Sehweisen.

Die subjektive Konzentrationsleistung für die Fixierung der Scheibe beim Einsatz des zentralen und peripheren Gesichtsfelds (zentral und peripher / Gegenwart und Zukunft) nimmt zum Ende des Versuchs ab.

Die Parcourszeichnungen zeigen in der Qualität (im Vergleich von Anfang und Ende des Versuchs) keinen wesentlichen Unterschied.

### 4. Diskussion der Methode

Betrachtet man die in diesem Versuch angewendete Methode zur Datengewinnung, erkennt man deutlich deren Grenzen und Kritikpunkte. Im Folgenden werden diese diskutiert.

#### 4.1. Gesichtsfeld

Die vorliegende Arbeit untersucht die Leistungsfähigkeit von peripherem und zentralem Gesichtsfeld beim Nachtsehen.

In dieser Untersuchung wird für „peripher“ der Gesichtsfeldbereich  $> 30^\circ$  gewählt. Das zentrale Gesichtsfeld ist in diesem Fall der Bereich innerhalb  $30^\circ$ .

Wie aber sind die Begriffe „zentrales“ beziehungsweise „peripheres“ Gesichtsfeld definiert? Der Begriff zentrales Sehen wird häufig mit fovealem Sehen gleichgesetzt. Demnach wäre der zentrale oder foveale Anteil des Gesichtsfeldes im Durchmesser lediglich 1,5 mm oder  $5,2^\circ$  groß (Wandell, 1995).

In den Arbeiten auf dem Gebiet der Psychophysik (wobei es meist um Schwellenmessungen geht) findet man bei Fahle (1991) die Formulierung: „Die Fovea und die zentralen  $10^\circ$  des Gesichtsfelds“ (so auch bei Sivak und Mc Kenzie, 1990). Andere Untersuchungen zur Bewegungs- und Musterauflösung, zum Beispiel Solomon und Sperling (1996) definieren  $3,9^\circ$  als zentral, und  $10^\circ$  bereits als peripher (so auch Wässle et al., 1989). Warren und Kurtz (1992) definieren Bereiche außerhalb von  $20^\circ$  des Gesichtsfelds als peripher, und typischerweise peripher erst ab  $> 40^\circ$  Exzentrizität. Die relativ seltene Einbeziehung der weiteren Peripherie des Gesichtsfelds bemängeln auch Thorpe et al. (2001), die in ihrer Untersuchung für Detektionsaufgaben  $13^\circ$ ,  $44^\circ$  und  $54,5^\circ$  gewählt haben. Nur in einer Untersuchung zur Mustererkennung von Chaparro und Young (1993) wird zentrales Sehen über Zapfenvermittlung und peripheres Sehen über Stäbchenvermittlung definiert. Hier sind Exzentrizitäten von  $10^\circ$ ,  $15^\circ$  und  $20^\circ$  gewählt worden.

Insgesamt ist die Definition von zentralen beziehungsweise peripheren Gesichtsfeldanteilen in der Literatur uneinheitlich. Der gewählte Bereich scheint jeweils von der subjektiven Überzeugung des Untersuchers geleitet, wobei die Fragestellung des Experiments und apparative Möglichkeiten eventuell eine Rolle spielen.

#### **4.2. Compliance**

Ein Hauptkritikpunkt an der Datengewinnung im vorliegenden Experiment ist die hohe Abhängigkeit von der Mitarbeit der Probanden.

Sehen mit der Peripherie wird erreicht, indem die Probanden einen Leuchtpunkt fixieren. Dabei sollten möglichst keine Augenbewegungen stattfinden. In diesem Versuch erfolgt jedoch keine Fixationskontrolle. Fixationskontrolle ist bei den sonst üblichen Experimenten in der Psychophysik mit monitorgenerierten Reizen über eine stationäre Kamera möglich.

Bei der vorliegenden Untersuchung kann neben der fehleraufzeichnenden Kamera keine Fixationskontrolle installiert werden. Diese würde die Sicht der Probanden in erheblichem Maß beeinträchtigen und den technischen und finanziellen Rahmen der Untersuchung sprengen.

#### **4.3. Nachtbeleuchtung**

Über die Beleuchtungsstärke in der Dämmerung und bei Nacht sind in der Literatur wenige Daten zu finden. In Linkes meteorologischem Taschenbuch (1951) wird die mittlere Globalbleuchtungsstärke in Lux bei Nacht in Abhängigkeit vom Mondalter, der Mondhöhe und des Bewölkungsgrades gemessen. Hier werden Maximalwerte von 0,68 Lux bei Vollmond und 60° Mondhöhe sowie der Minimalwert von 0,00 Lux bei einer Mondhöhe von -5° (hier unabhängig vom Mondalter) angegeben.

Im Explanatory supplement of the Astronomical Almanac (1992) wird die indirekte Illumination einer Fläche bei nautischer Dämmerung mit  $6 \times 10^{-4}$  Lux angegeben.

Bei Untersuchungen auf dem Gebiet der Psychophysik (Schwellenmessungen) zum skotopischen Sehen findet man in der Literatur sehr unterschiedliche Angaben. Bei Chaparro und Young (1993) wird Stäbchensehen zur Untersuchung der Mustererken-

nung durch Filter isoliert, sodass Lichtintensitäten von  $0,42 \log$  „scotopic trolands“ entstehen (siehe auch Savage und Banks, 1992). Dabei bleibt zu bedenken, dass diese Methoden nicht ohne weiteres auf „real world settings“ mit überschwelligen Reizen (siehe Hess et al., 1990) übertragbar sind.

Untersuchungen im skotopischen oder mesopischen Leuchtdichtebereich sind sehr selten. Rassow (1999) untersucht den Leuchtdichteinfluss auf Kontrast- und Blendungsempfindlichkeit im mesopischen Bereich mit einer Umgebungsleuchtdichte von  $0,1 \text{ cd} / \text{m}^2$  (mittlerer mesopischer Bereich). Üblicherweise wird laut Rassow (1999) (nach DOG-Richtlinien zur Führerscheintauglichkeit) im Bereich von  $0,032 \text{ cd} / \text{m}^2$  (unteres Drittel des mesopischen Bereichs) gemessen. Die Untersucher Kyuk und Elliot (1999) haben die Mobilität von Probanden bei mesopischen Beleuchtungsstärken von  $2,5 - 3,4 \text{ cd} / \text{m}^2$  in einem Hindernisparcours gemessen.

Ungenaue Angaben über Beleuchtungsstärken bei Nacht in natürlicher Umwelt finden sich in Arbeiten zur Verkehrssicherheit wie von Rumar (1990). Er findet bei Dämmerung  $<1000 \text{ Lux}$  Himmelsbeleuchtung. Die Werte sind uneinheitlich, auch was die Angaben in den verschiedenen Messeinheiten betrifft. Deshalb sind für dieses Experiment eigene Messungen durchgeführt worden.

#### 4.4. Wahl des Untersuchungsraums

Bei den Vorüberlegungen zum Versuchsdesign ist zunächst die Überlegung wichtig, ob es mit dieser Fragestellung „Untersuchung der visuellen Orientierung bei Nachtbeleuchtung“ möglich ist, das Experiment im Freien, bei „echter“ Nachtbeleuchtung durchzuführen (wie zum Beispiel Kyuk und Elliot, 1999). Dabei werden verschiedene Möglichkeiten, wie der Einsatz von Filtern für Tageslicht (ähnlich wie bei Savage und Banks, 1992) überdacht. Auch der Einsatz einer Trendelenburg-Brille (wie bei Rassow, 1990 beschrieben) wäre eventuell möglich gewesen. Gegen eine Durchführung im Freien sprechen folgende Gründe:

- Die mangelnde Standardisierung der Beleuchtungsbedingungen für alle Probanden.
- Die Schwierigkeit, einen Platz zur Durchführung -ohne Einfluss von Zivilisationsbeleuchtung- zu finden.
- Abhängigkeit von Witterungsbedingungen.

Deshalb wird der Untersuchungsrahmen wie beschrieben gewählt. Hierbei weist der lange Flur den Nachteil auf, nur wenige Richtungswechsel beim Durchlauf zu erlauben (siehe Kyuk und Elliot, 1999).

#### **4.5. Messdatengewinnung hinsichtlich der Fragestellung**

Wenn man die reine Leistungsfähigkeit von zentralen und peripheren Gesichtsfeldanteilen messen möchte, dann kann die vorliegende Untersuchung Antwort geben. Die Frage: „WIE VIEL haben die Probanden jeweils gesehen“? wird hinreichend beantwortet. Die Frage jedoch, die dahinter steht, ob mit dem peripheren Gesichtsfeld das Sehen eher unbewusst erfolgt, das heißt, „WIE haben sie gesehen“?, ist schwieriger zu beantworten.

Merikle und Reingold (1992) beschreiben in ihrer Arbeit zwei Arten der Messung bewusster und unbewusster Wahrnehmung. Differenzierungsaussagen, die mittels des so genannten „Dissoziationsparadigmas“ erzielt werden, sind wenig valide.

Reine Dissoziations-, das heißt, Unterscheidungsaufgaben, lassen nur quantitative Aussagen zu. Andere Aufgaben, in denen ein qualitativer Unterschied zwischen der Wahrnehmung und Erkennung („Detection“ und „Recognition“) am selben Reiz deutlich wird, besitzen laut Merikle und Reingold höhere Validität. In ihrem Experiment haben Probanden nach der Detektion zweier geometrischen Formen in der anschließenden „Präferenz Aufgabe“ (Präsentation einer von beiden Formen zusammen mit einer unbekannt Form) bei der Frage nach der bevorzugten Form signifikant häufiger die zuvor präsentierte Form ausgewählt. Die höhere Sensitivität in der indirekten Messung wird von den Untersuchern als Nachweis unbewusster Wahrnehmung gewertet. Den Einwand, die Aufmerksamkeit könne die Wahrnehmung beeinflussen, haben die Autoren ebenfalls untersucht (mittels einer Worterkennungsaufgabe). Mit paralleler Präsentation von hervorgehobenen und nicht hervorgehobenen Worten in der Detektionsaufgabe und anschließender Präsentation der ungecueten Worte in der Erkennungsaufgabe finden sie das geforderte Muster der höheren Sensitivität bei der indirekten Messung, was unbewusster Wahrnehmung entspricht. Es bleibt die Frage, ob in der vorliegenden Arbeit diese Kriterien ausreichend erfüllt sind.

Zum einen reicht für die Bewältigung des Parcours eine bloße Detektion der Hindernisse aus, es wird dabei kein qualitativer Unterschied in der Leistung der einzelnen Sehweisen deutlich. Der Versuch, die Wahrnehmung mittels (von Merikle und Reingold als nicht valide eingestuften) verbaler Angaben im Fragebogen zu spezifizieren, ist schwierig. Direkte Fragen nach „bewusster“ oder „unbewusster“ Wahrnehmung sind hoch suggestiv und bergen die Gefahr, die erwünschte Antwort zu erhalten. So werden die Fragen nach subjektiver Präferenz der einzelnen Sehweisen gestellt, was wenig spezifische Schlüsse zulässt.

Die Beschreibung von bewusster oder unbewusster Wahrnehmung mit Hilfe von Parcourszeichnungen wird ebenfalls noch diskutiert werden.

Insgesamt bleibt zu sagen, dass bei Untersuchungen im „real world setting“ die Methode immer mehr Kritikpunkten ausgesetzt bleibt als unter virtuellen, (aber genauer definierbaren) Bedingungen.

Dennoch werden in dieser Untersuchung wichtige Fragen beantwortet, die die methodische Verfeinerung ähnlicher Versuche künftig vereinfachen wird.

## 5. Allgemeine Diskussion

### 5.1. Fehler

Bei der Diskussion der Ergebnisse muss bedacht werden, dass es bisher wenig ähnliche Arbeiten gibt und die vorliegenden Referenzen daher nur eingeschränkt zum Vergleich geeignet sind. Dennoch sind sie zur Relativierung der vorliegenden Resultate heranzuziehen. Es hat sich in dieser Arbeit gezeigt, dass der Einsatz des zentralen Anteils des Gesichtsfelds bei skotopischer Beleuchtung gegenüber peripheren Anteilen - entgegen der aufgestellten Hypothese - von Vorteil zu sein scheint, was die Anzahl der gemachten Fehler angeht.

Die Sehweise mit dem zentralen Gesichtsfeld in der Gegenwart ist mit der niedrigsten Fehlerzahl (7,8 mit Standardabweichung 4,9) signifikant verschieden zu allen anderen Sehweisen.

Unter skotopischen Bedingungen wird die Überlegenheit der fovealen Region auch von Chaparro und Young (1993) nachgewiesen. In deren Arbeit geht es um die räumliche Mustererkennung im zentralen gegenüber dem peripheren Sehen, was hier mit Zapfen- und Stäbchensehen gleichgesetzt ist. Die Lesegenauigkeit beträgt bei 20° Exzentrizität im Gesichtsfeld nur noch 40-60% der zentralen 100%. Insgesamt ist die Mustererkennung optimal nahe der Fovea, aber unabhängig von Rezeptortyp und -dichte (die Stäbchendichte ist am höchsten bei 20°, siehe Curcio et al., 1990).

Die ursprünglich angenommene Hypothese von der Überlegenheit der peripheren Gesichtsfeldanteile für bestimmte Aufgaben ist nicht neu. Brandt et al. (1973) sowie Dichgans und Brandt (1978) haben postuliert, dass die periphere Retina bei der Wahrnehmung räumlicher Orientierung und von Eigenbewegung eine dominierende Rolle spielt. Diese Hypothese wird von Warren und Kurtz (1992) in Frage gestellt. In ihrer Untersuchung wird die Einschätzung von Richtungspositionierung mittels optischem Fluss am Monitor gemessen. Mit dem Einsatz des zentralen Gesichtsfelds ergeben sich genauere Einschätzungen als mit dem Einsatz des peripheren Gesichtsfelds. Daraus folgern die Autoren, dass es keine Dominanz in der Wahrnehmung von Eigenbewegung mit dem peripheren Stimulationsort gibt. Hierbei

bleibt zu beachten, dass beide oben genannten Arbeiten unter fotopischen Bedingungen durchgeführt worden sind.

Die Wichtigkeit visueller Information aus der Gesichtsfeldperipherie für die Wegbewältigung wird von Alfano und Michel (1990) betont. Mit zunehmender Gesichtsfeldrestriktion ( $22^\circ$ ,  $14^\circ$ ,  $9^\circ$ ) im Vergleich zum vollen Gesichtsfeld verschlechtert sich in ihrem Experiment die Fähigkeit zur Wegbewältigung (unter fotopischen Bedingungen) signifikant. (Dabei wird die Überlappung visueller Information aus beiden Gesichtsfeldanteilen bei Augenbewegungen berücksichtigt.)

Diese Ergebnisse weisen in dieselbe Richtung wie die Ausgangshypothese der vorliegenden Untersuchung. Bei Alfano und Michel (1990) gehen nur zwei Wegdurchläufe (einmal mit einer bestimmten Restriktion, einmal mit vollem Gesichtsfeld) in die Ergebnisse ein. Über ausschließlich periphere Informationen werden keine Daten gewonnen.

Unsere Probanden haben das gesamte Gesichtsfeld- bis auf die Fovea (p+z / G+Z)- zur Verfügung. Außerdem benutzen sie in zwei Durchläufen die zentralen  $30^\circ$  (z / G und z / Z), und schließlich die Sehweise mit explizit peripherer Information (p / Z) ohne die zentralen  $30^\circ$ . Die höhere Zahl der Durchläufe im vorliegenden Versuch sowie das unterschiedliche Ausmaß der zentralen Restriktion sind eventuell für die gegenläufigen Ergebnisse im Vergleich zur Untersuchung von Alfano und Michel verantwortlich.

Was der Verlust des peripheren Gesichtsfelds ausmacht, wird im klinischen Alltag bei Patienten mit der so genannten tapetoretinalen Dystrophie deutlich. Bei dieser Erkrankung kommt es auf Grund verschiedener Enzymdefekte zu kristallinen Ablagerungen in der Kornea und der Retina. Dadurch entstehen unter anderem parazentrale Skotome und es kann demzufolge das periphere Gesichtsfeld nicht mehr voll eingesetzt werden.

Solche Fälle sind von Viestenz et al. (2002), von Austermann et al. (2001) sowie von Jurklies et al. (2001) beschrieben worden. Eben solche praktische Relevanz zeigen Experimente von Kyuk und Elliot (1999) zur Mobilität von Patienten mit altersbedingter Makuladegeneration und von Rumar (1990) sowie Owsley und Mc Gwin (1999) zur Verkehrssicherheit. (siehe auch Rassow, 1997 und Lachenmayr, 2003). Kyuk und Elliot (1999) haben bei Patienten, die auf Grund altersbedingter Makuladegeneration



(charakterisiert durch Verlust des zentralen Sehens, Verminderung der Sehschärfe, der Kontrastsensitivität, des Farbsehens und Adaptationsstörung) nur noch durchschnittlich 67% des Gesichtsfeldes zur Verfügung haben, die Mobilität unter fotopischen und mesopischen Bedingungen untersucht (mittels zweier „indoor“- Hindernisparcours sowie einem Weg im Freien.) Dabei nimmt die Mobilität der Patienten (gemessen an der Fehlerzahl) unter mesopischen Bedingungen im Vergleich zu fotopischer Beleuchtung deutlich ab, die Zeit zur Bewältigung nimmt zu. Bei Kyuk und Elliot liegt die höchste mittlere Fehlerzahl (mit 60 Hindernissen im Parcours auf 30,5 m) bei 15,5 Fehlern. Der prozentuale Anteil an Fehlern liegt dort deutlich höher als in dieser Studie. Dies liegt vor allem an der Definition des „Fehlers“ im Parcours. Während die Definition des Fehlers hier ausschließlich der sichtbare Objektkontakt mit oder ohne Verschiebung ist, reicht Kyuk und Elliots Fehlerdefinition weiter. Zum Beispiel zählen abnormale Fußpositionierung, Trippeln, Gleichgewichtsverlust, Suchbewegung mit Hand und Fuß und Geländerkontakt als Fehler. Es erklärt den Unterschied zur Fehlerausbeute zu dieser Untersuchung, die unter Anwendung der Definition von Kyuk und Elliot sicher höher gewesen wäre.

Eine andere Arbeit, die die Relevanz der peripheren visuellen Information betont, stammt von Rumar (1990). Es geht um die Verkehrssicherheit von Autofahrern. Hier wird ein Detektionsfehler für Informationen im peripheren Gesichtsfeld bei niedrigen Beleuchtungsstärken vorrangig für Zwischenfälle beim Autofahren verantwortlich gemacht.

In Rumars Arbeit spielen zwei Komponenten eine Rolle: Aufmerksamkeit und unbewusste, „automatische“ Wahrnehmung. Nach Rumar ist (evolutiv bedingt), die Wahrnehmung von Zielen in der Peripherie des Gesichtsfelds unbewusst, schnell und effektiv. Die heutige Straßensituation erfordert seiner Einschätzung nach jedoch nicht das automatische, so genannte „fähigkeitsbasierte“ Sehen, sondern das so genannte „regelbasierte“ Sehen mit kontrollierter Fokussierung der Aufmerksamkeit (siehe auch Rasmussen, 1980).

In unsere vergleichende Untersuchung von peripherem und zentralem Sehen fließt ebenfalls die Frage ein, ob die Wahrnehmung mit der Peripherie unbewusst ist, im Vergleich zur bewussten Wahrnehmung mit dem fovealen Gebiet.

Die Schwierigkeiten bei der Messung unbewusster Vorgänge sind im vorigen Kapitel angedeutet worden (siehe auch Merikle und Reingold, 1992). Bei Patienten mit Gesichtsfeldausfällen scheint die gesuchte Differenzierung einfacher zu beobachten zu sein. Diese Patienten können keine Angaben zu visuellen Reizen im blinden Gebiet des Ausfalls machen. Trotzdem können sie adäquat auf diese Reize reagieren. Perenin und Rosetti (1996) nennen dies in ihrer Untersuchung „Action without conscious perception“ (siehe auch Zeki und Ffytche, 1998). (Konträre Meinungen siehe Fendrich et al., 1992, Lennie und Fairchild, 1994, Sahaire et al., 2002). Fendrich et al. (1992) bezweifeln das Phänomen von Blindsight und führen es auf noch funktionsfähige „Inseln des Sehens“ im Gebiet des Ausfalls zurück.

Unbewusste Wahrnehmung oder „Blindsight“ bei gesunden Probanden nachzuweisen, haben Koch und Braun (1995) versucht. Sie definieren in ihrer Studie Blindsight bei gesunden Probanden nur in zwei Situationen: Bei unterschwelligen Reizen mit Methoden der Psychophysik oder bei Unaufmerksamkeit.

Die Frage nach der Kopplung von bewusster Wahrnehmung und Aufmerksamkeit ist zu diskutieren. Nicht nur Koch und Braun (1995) postulieren die Abhängigkeit bewussten Sehens von Aufmerksamkeitsprozessen. Chun und Marois (2002) diskutieren in ihrem Artikel den Effekt von „inattention blindness“ und setzen diese mit unbewusster Wahrnehmung gleich. Präattentive Wahrnehmung erfolgt laut diesen Wissenschaftlern bis zum Niveau der Objektidentifikation, nicht jedoch bis zu ihrer (bewussten) Erkennung. Dieselbe Theorie vertreten auch Milner und Goodale (1995). Sehen ohne Aufmerksamkeit wird auch im Experiment von Braun und Sagi (1990) an einer „feature-gradient“-Aufgabe nachgewiesen, bei dem die fokale Aufmerksamkeit durch eine vorgegebene Aufgabe gebunden wird.

Die Frage bleibt, ob im vorliegenden Experiment die Aufmerksamkeit ausreichend an den Fixierpunkt gebunden ist, sodass unbewusstes Sehen mit der Peripherie stattfindet. Die Antwort bleibt spekulativ, weil keine eindeutige Isolierung der einzelnen Komponenten möglich ist. In Untersuchungen mit funktioneller Magnetresonanztomographie von Kastner et al. (1998) zur sensorischen Suppression von Stimuli wird ein starkes Fixationsziel gefordert, um die Aufmerksamkeit zu binden (zum Beispiel eine Unterscheidungsaufgabe am zentralen Fixationsort). Man könnte bei der hier

diskutierten Studie die Antworten der Probanden nach dem Ausmaß der Konzentration auf den Fixierpunkt als Hinweis für das Ausmaß der Aufmerksamkeitsbindung werten. Die Ergebnisse zeigen, dass die Konzentration (= Aufmerksamkeit an den Fixierpunkt gebunden?) anfangs im höheren Bereich liegt. Im Verlauf der Untersuchung bewegt sie sich hin zu niedrigen Einschätzungen. Es ist möglich, dass die Aufmerksamkeit vom Fixierpunkt in die Peripherie verschoben wird, sodass „bewusste“ Wahrnehmung auch mit peripheren Gesichtsfeldanteilen stattfindet. Könnte sich das vielleicht an der Fehlerzahl über die Versuchstage ablesen lassen? Zieht man die Ergebnisse heran, sieht man lediglich einen signifikanten Unterschied von Tag eins und Tag zwei zu Tag vier, nicht jedoch zwischen den Tagen eins, zwei und drei. Also hilft dieses Ergebnis zur Klärung der Frage nicht weiter. Mit unseren Ergebnissen muss man annehmen, dass die Aufmerksamkeit von Beginn an jeweils im eingesetzten Gesichtsfeldbereich liegt. Die oben genannten Signifikanzunterschiede der Versuchstage sind lediglich als Hinweis für das Vorhandensein perzeptuellen Lernens einzustufen (zur Beurteilung perzeptuellen Lernens siehe Sagi und Tanne, 1994). Die subjektiven Einschätzungen der Teilnehmer zu den peripheren Sehweisen waren: „Intuitiveres, indirekteres Sehen“, „Sehen ohne Konzentration“. Dass die Aufmerksamkeit nicht an den Fixierpunkt gebunden ist, könnte erklären, warum die periphere und zentrale Sehweisen „in der Zukunft“ nicht signifikant verschieden sind. Dieser Auffassung widerspricht, dass die zentral / Gegenwart-Sehweise dazu signifikant verschieden ist. Aufmerksamkeitsabhängigkeit kann die Ergebniskonstellation also nicht hinreichend erklären. Es lohnt sich eine Betrachtung der Zeichnungen der Probanden. Der zugrundeliegende Gedanke ist, weitere Hinweise auf die Art des Sehens zu gewinnen.

Betrachtet man die Zeichnungen von S.K., könnte der erste Gedanke sein: „Hat sie das alles nicht gesehen“? Bedeutet das, dass die Hindernisse tatsächlich nicht erkannt werden? Laut Chun und Marois (2002) würde es bedeuten, dass sie nur bis zur „handlungsrelevanten“ Objektidentifikation, nicht aber zur Objekterkennung und damit zur Reproduktionsfähigkeit verarbeitet werden. Es läge demzufolge unbewusstes Sehen vor. Vieles spricht gegen diese Interpretation. Hauptsächlich die Tatsache, dass die Zeichnung am Ende jeden Versuchstages angefertigt wird. Dabei stehen den Probanden die (redundanten) Informationen sowohl aus den zentralen als auch aus den peripheren

Sehweisen zur Verfügung. Es ist davon auszugehen, dass mit den Zeichnungen weniger die Wahrnehmungsleistung als vielmehr die Gedächtnisleistung der Probanden getestet wird. Diese Unzulänglichkeit von Verhaltensstudien (im Vergleich zu Untersuchungen mit funktioneller Magnetresonanztomographie), Perzeptionsmängel von Gedächtnismängeln zu unterscheiden, wird von Rees und Lavie (2001) betont.

Dass es sich bei den Zeichnungen eher um eine Gedächtnisleistung handelt, wird bestärkt, wenn man die Zeichnung von G.S. betrachtet, die am detailgenauesten ist. G.S. gibt an, sich beim Blinndurchgang am Gedächtnis zu orientieren. Ein anderer Teilnehmer gibt an, keine Zeichnung anfertigen zu können, weil „schon wieder vergessen“. Neueste Hypothesen wie von Zeki (2001), der die zeitliche und räumliche Asynchronität visueller Verarbeitung mit dem Vorhandensein von Mikrobewusstseins -ebenen an verschiedenen Stellen der Reizverarbeitung postuliert, weisen in eine interessante Richtung bei der Erforschung des kognitiven Unbewussten.

Die Frage, warum die zweite zentrale Sehweise - in der Zukunft- sich als signifikant schlechter als ihr zentrales Pendant erweist und sich nicht (wie die zentral / Gegenwart-Sehweise) signifikant von den anderen unterscheidet, bleibt offen.

Hierbei könnte das Gedächtnis eine wesentliche Rolle spielen.

Erhält man den für die unmittelbare Aktion relevanten Seheindruck sofort, also in der Gegenwart (Sehweise zentral / Gegenwart), so setzt dies möglicherweise keinen wesentlichen Gedächtniseinsatz voraus. Bei der Sehweise zentral / Zukunft müssen die Probanden mit demselben zentralen Gesichtsfeldausschnitt den Blick nach geradeaus (und nicht direkt zum Boden) halten. Das bedeutet, die Information muss bis zum Erreichen des gesehenen und darauf folgend handlungsrelevanten Punkt gespeichert werden. Ob und wie dies tatsächlich geschieht, lässt sich in diesem Experiment nicht eindeutig nachweisen.

Zieht man die Antworten der Versuchsteilnehmer auf die Frage, welche der beiden zentralen Bedingungen angenehmer ist, zu Rate, findet sich eine eindeutige Präferenz für die zentral / Gegenwart-Sehweise. Begründung dafür ist durchweg der „direkte Blick auf die Hindernisse vor die Füße“. Ein Teilnehmer (S.M.) kommentiert die Frage mit: „Bis ich da ankomme, habe ich schon wieder vergessen, wie es war“.

In der Literatur sind Untersuchungen zum visuellen Arbeitsgedächtnis häufig mit sakkadischen Augenbewegungen verknüpft (Mallot, 2000). In unserem Experiment sollen jedoch möglichst keine Augenbewegungen stattfinden. Dennoch könnte man postulieren, dass die Gedächtniskapazität nicht ausreicht, um die gleiche Leistung wie mit der Sehweise zentral / Gegenwart zu erbringen. Beim Blick zum Boden sieht man umgerechnet circa 4,25 Hindernisse / m, beim Blick geradeaus sind es wesentlich mehr (Parcours auf ganzer Länge.).

Kastner et al. (1998) weisen in ihrer Arbeit auf die Abhängigkeit des visuellen Arbeitsgedächtnisses von der Aufmerksamkeit hin. Lässt sich also aus unserer Annahme vom unzureichenden Gedächtniseinsatz ein Mangel an Aufmerksamkeit und damit auch an bewusster Wahrnehmung schlussfolgern? Dies würde bedeuten, dass bewusstes oder unbewusstes Sehen (wie oben postuliert) weniger von bestimmten Gesichtsfeldanteilen oder Rezeptoren abhängt als viel mehr von der Aufmerksamkeit (dazu siehe auch Britten, 1996, Ingram, 2002).

Die Überlegenheit der fovealen Gesichtsfeldregion für die Parcoursbewältigung kann nicht zuletzt auch mit der kortikalen Repräsentation zusammenhängen. Wässle et al. (1989) betonen, dass die zentralen  $8^\circ$  des Gesichtsfelds die Hälfte von V1 besetzen. Daraus kann eine größere Verarbeitungskapazität für Reize aus dem zentralen Gesichtsfeldanteil geschlossen werden.

## **5.2. Einfluss der Zeit**

Ob und welche Rolle die für die Wegbewältigung benötigte Zeit spielt, soll im Folgenden diskutiert werden. Für die zentrale Sehweise in der Gegenwart benötigten die Probanden im Mittel 160 Sekunden (2,67 Minuten mit Standardabweichung von 134 Sekunden). Das entspricht einer Gehgeschwindigkeit von  $0,15\text{ m / sec.}$  ( $0,54\text{ km / h}$ ). Die Versuchspersonen benötigen signifikant mehr Zeit beim Gebrauch des zentralen Gesichtsfelds in der Gegenwart als beim Benutzen von zentralem und peripherem Gesichtsfeld gemeinsam: 120 Sekunden mit Standardabweichung 37,5 Sekunden. Dies entspricht einer Gehgeschwindigkeit von  $0,2\text{ m / sec.}$  oder  $0,72\text{ km / h}$ . Ebenfalls schneller als mit dem Zentrum „in der Gegenwart“ wird der Weg mit dem zentralen Gesichtsfeld „in der Zukunft“ bewältigt.

In einer vergleichenden Untersuchung des zentralen und peripheren Gesichtsfelds bezüglich der Objekterkennung (Thorpe et al., 2001) nimmt nicht nur die Sehleistung (% korrekt erkannt) mit der Exzentrizität ab. Die Reaktionszeit nimmt mit der Exzentrizität im Gesichtsfeld linear zu. Ähnliches würde man auch in unserem Experiment erwarten. Eventuell liegt der Unterschied darin begründet, dass die Ergebnisse von Thorpe et al. unter fotopischen Bedingungen gewonnen worden sind. Auch die Studie von Alfano und Michel (1990) findet unter fotopischen Bedingungen statt, die Ergebnisse sind bezüglich der Zeit übereinstimmend mit unseren. So benötigen Probanden mit einem zentralen Gesichtsfeldanteil von  $9^\circ$  beziehungsweise  $14^\circ$  doppelt so lange Zeit für die Wegbewältigung als beim Einsatz des Gesamtgesichtsfelds. Die Gehgeschwindigkeit beträgt hier  $0,5\text{ m / sec.}$  ( $1,8\text{ km / h}$ ) mit zentraler Restriktion und  $0,9\text{ m / sec.}$  ( $3,24\text{ km / h}$ ) ohne Restriktion. Dass die Probanden wesentlich schneller auf einer vergleichbaren Strecke gehen, liegt unter Umständen an den fehlenden Hindernissen und an fotopischen Lichtverhältnissen.

Patienten mit altersbedingter Makuladegeneration bei Kyuk und Elliot (1999) benötigen signifikant mehr Zeit für die Parcoursbewältigung unter mesopischen als unter fotopischen Lichtverhältnissen. In der Untersuchung betragen die Gehgeschwindigkeiten für den Indoor- Parcours unter mesopischer Beleuchtung  $0,29\text{ m / sec.}$  ( $1,04\text{ km / h}$ ), unter fotopischen Bedingungen  $0,4\text{ m / sec.}$  ( $1,44\text{ km / h}$ ). Bei uns liegt die Geschwindigkeit beim Einsatz des peripherem Gesichtsfelds bei  $0,2\text{ m / sec.}$  ( $0,72\text{ km / h}$ ), ist also langsamer. (Sowohl bei Kyuk und Elliot wie auch in der vorliegenden Untersuchung haben den Probanden die Anweisung erhalten, in einem für sie angenehmen Tempo zu gehen.) Der Unterschied zur Studie der Amerikaner mag darin begründet liegen, dass die Beleuchtungsstärke in unserer Untersuchung niedriger ist. Fraglich bleibt, ob bei unserem Experiment eine Vorgabe der zur Verfügung stehenden Zeit für die Durchläufe (zum Beispiel mit einem Metronom, der die Schrittfrequenz vorgibt), nicht zu höheren Fehlerzahlen mit dem zentralen Gesichtsfeld und somit zum Beweis unserer Hypothese geführt hätte.

Ob es sich bei der unterschiedlichen Fehlerzahl und dem unterschiedlichen Zeitaufwand zwischen zentralen und peripheren Sehweisen wirklich um unterschiedliche Verarbeitungsprozesse handelt, muss in Frage gestellt werden. Es besteht auch die

Möglichkeit, dass Probanden für zentrale und periphere Sehweisen grundsätzlich verschiedene Strategien anwenden. So wird in den Sehweisen mit Einsatz des zentralen Gesichtsfelds möglicherweise vorsichtiger und langsamer vorgegangen. Dadurch entstehen weniger Fehler. Mit den peripheren Gesichtsfeldanteilen wird eventuell weniger Vorsicht geübt, was zu schnelleren Durchläufen und zu mehr Fehlern führt. Weshalb die Probanden mit der zentralen Sehweise in der Zukunft ähnlich schnell sind wie mit den peripheren Sehweisen, bleibt offen.

Es bleibt auch noch die positive Korrelation von Fehlern und Zeit für die Sehweise peripher / Zukunft in unserer Untersuchung zu betrachten. Hier fehlt vermutlich eine ausreichend lange Informationsspeicherung im Arbeitsgedächtnis, weshalb beim Einsatz dieser Sehweise mit steigendem Zeitaufwand mehr Fehler entstehen.

Im Bezug auf die oben genannte Korrelation macht die Anwendung der Ausgangsannahme wenig Sinn, nach der zentrales Sehen bewusst und peripheres Sehen unbewusst erfolgt. Rumar (1990) nimmt an, dass unbewusstes, (automatisches) Sehen in der Peripherie schnell und effektiv, und zentrales, bewusstes Fokussieren langsam ist. Dieser These widerspricht allerdings die ähnliche Geschwindigkeit in der zentralen Sehweise in der Zukunft zu den peripheren Sehweisen. Eine weitere Erklärungsmöglichkeit der Zeitunterschiede zwischen zentralem und peripherem Sehen könnte der Einsatz verschiedener Rezeptoren im Gesichtsfeld sein. Am zentralen Sehen sind hauptsächlich Zapfen beteiligt, das periphere Sehen (Nacht- und Dämmerungssehen) ist stäbchenvermittelt. Die Sensitivität der Zapfen reicht bei nächtlichen Beleuchtungsverhältnissen nicht aus. Da die Fovea stäbchenfrei ist, entsteht beim Nachtsehen ein zentrales Skotom (siehe auch Chaparro und Young, 1993). Dies könnte den höheren Zeitaufwand bei Verwendung zentraler Gesichtsfeldanteile erklären. Ein weiterer Grund könnte in der unterschiedlichen Konvergenz von Stäbchen und Zapfen auf die Ganglienzellen auf retinaler Ebene liegen (siehe Boycott und Wässle, 1991).

Schon in der Retina erfolgt die Segregation der verschiedenen Rezeptortypen in zwei vertikale Wege durch Verbindungen zu unterschiedlichen Ganglienzellen (siehe Boycott und Dowling, 1969).

Andererseits weisen aktuellere Untersuchungen auf die Konvergenz der Stäbchen- auf Zapfenwege im inneren plexiformen Layer der Retina hin (Blomfield und Dacheux,

2001). Laut Okano et al. (1992) spricht dies für die evolutive Präexistenz des Zapfensystems vor dem Stäbchensystem. Geht man demzufolge davon aus, dass Seheindrücke aus dem Stäbchen- und Zapfensystem nicht vollkommen getrennt voneinander verarbeitet werden, könnte es die Annahme stärken, dass die unterschiedlichen Ergebnisse nicht allein auf verschiedene Verarbeitungskanäle zurückzuführen sind.

Kortikal wird eine Separation von zentralen und peripheren Gesichtsfeldanteilen von Van Essen et al.(1992) postuliert. In Anlehnung an das bekannte Modell von WAS- und WO- Wegen in den höheren kortikalen Arealen wird bei Van Essen et al. dem posterior-parietalen Kortex eine größere Repräsentation des peripheren Gesichtsfelds zugeschrieben. 60% der rezeptiven Felder im parietalen Kortex liegen ausserhalb der Fovea, während 100% der inferioren temporalen rezeptiven Felder die Fovea beinhalten. Dies deutet auf eine neuroanatomisch vorgebahnte Überlegenheit der Fovea hin, was unsere Untersuchungsergebnisse stützen würde.



## 6. Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit vergleicht die Leistungsfähigkeit des peripheren mit der des zentralen Gesichtsfelds für die visuelle Orientierung beim Nachtsehen.

Es soll zum Einen untersucht werden, ob das periphere Gesichtsfeld für die Orientierung bei skotopischer Beleuchtung besser geeignet ist als das zentrale Gesichtsfeld.

Die zweite Frage ist, ob das Sehen in der Nacht mit der Peripherie unbewusst abläuft, während das Sehen mit zentralen Gesichtsfeldanteilen mit bewusstem Sehen gleichgesetzt werden kann.

Dafür wird ein Parcours mit Hindernissen aufgebaut, den die Versuchsteilnehmer mit verschiedenen Gesichtsfeldanteilen bei Nachtbeleuchtung durchlaufen. Die Leistung wird über die Häufigkeit des Anstoßes an den Hindernissen im Parcours (Fehler) gemessen, sowie über die benötigte Zeit zur Wegbewältigung.

Der Versuch ist als Paarvergleichsstudie mit Messwiederholungen angelegt. Dazu werden an vier Versuchstagen vier verschiedene Hindernisaufstellungen mit fünf verschiedenen Sehweisen durchlaufen. Das zentrale Gesichtsfeld mit 30° Ausdehnung wird in zwei Sehweisen eingesetzt, bei denen die Probanden eine schwarze Pappbrille mit entsprechend großen Öffnungen tragen. Damit schauen sie einmal direkt zum Boden, dann gehen sie mit Blick geradeaus durch den Parcours (Sehweise **zentral / Gegenwart** und **zentral / Zukunft**). Hier fließt der Zeitpunkt der Verfügbarkeit der visuellen Information für die Orientierung mit ein (in der Gegenwart oder in der Zukunft). Die peripheren Gesichtsfeldanteile werden beim Durchlaufen des Parcours mit Fixation auf verschieden große Scheiben benutzt. Einmal mit einer kleinen Fixierscheibe, die die Fovea nicht wesentlich beeinträchtigt (Sehweise **zentral und peripher / Gegenwart und Zukunft**). Zum Anderen mit einer großen Fixierscheibe, die die zentralen 30° des Gesichtsfelds verdeckt (Sehweise **peripher / Zukunft**). Zur Kontrolle gehen die Freiwilligen einmal pro Versuchstag vollständig ohne visuelle Information durch die Hindernisaufstellung. Für jede Sehweise wird die Zeit für die Wegbewältigung gemessen und geht in die Auswertung mit ein. Die Frage nach unbewusstem und bewusstem Sehen wird über Fragen zur subjektiven Empfindung der Probanden im Versuch und durch Parcourskizzen zu klären versucht.

Die Ergebnisse zeigen, dass das zentrale Gesichtsfeld für die Orientierung beim Nachtsehen dem peripheren Gesichtsfeld überlegen ist, was die Genauigkeit der Hindernisvermeidung angeht. Hierbei ist es nach den vorliegenden Ergebnissen von Bedeutung, dass die visuelle Information für die Orientierung sofort, in der Gegenwart zur Verfügung steht. Werden zusätzlich oder ausschließlich die peripheren Gesichtsfeldanteile eingesetzt, verschlechtert sich die Performance der Probanden bei der Orientierung in der Nacht. Steht die visuelle Information für die Orientierung verzögert zur Verfügung (Zukunft), lässt sich keine Verbesserung der Leistung des zentralen Sehens gegenüber dem peripheren Sehen feststellen.

Zieht man die benötigte Zeit für die Durchgänge mit den einzelnen Sehweisen hinzu, relativieren sich die Ergebnisse. Es zeigt sich, dass für den Einsatz des Zentrums in der Gegenwart signifikant mehr Zeit benötigt wird als für die Sehweisen mit Einsatz der Peripherie. So geht die Orientierung beim Nachtsehen mit zentralen Gesichtsfeldanteilen in der Gegenwart auf Kosten der Geschwindigkeit.

Die Verknüpfung von unbewusstem Sehen und Sehen mit dem peripheren Gesichtsfeld oder von bewusstem Sehen mit zentralem Sehen kann in dieser Studie nicht nachgewiesen werden. Die vorliegenden Ergebnisse ergeben eher Hinweise darauf, dass visuelles Bewusstsein stark an Aufmerksamkeitsprozesse und an den Einsatz des visuellen Gedächtnisses geknüpft ist.

## 7. Literaturverzeichnis

- Alfano, P.L., Michel, G.F. (1990) Restricting the field of view: perceptual and performance effects.  
Perceptual and Motor Skills 70: 35-45
- Astronomical almanac,  
Explanatory supplement (1992) University Science Books: 490 ff.
- Austermann, P., Kuba, G.B.,  
Kroll, P. (2001) Makulopathie bei Myotoner Dystrophie  
Curschmann Steinert.  
Der Ophthalmologe 97 (11): 784-787
- Baur, Franz (1951) Linkes meteorologisches Taschenbuch.  
Leipzig, Akademische Verlagsgesellschaft
- Bloomfield, S.A., Dacheux, R.F. (2001) Rod vision: Pathways and processing in the  
mammalian Retina.  
Progress in Retinal & Eye Research  
May 20 (3): 351-384
- Blythe, I.M., Bromley, J.M.,  
Kennard, C., Ruddock, K.H. (1986) Visual discrimination of target displacement  
remains after damage to the striate cortex in  
humans.  
Nature Apr. 17-23 320 (6063): 619-621
- Boycott, B.B., Dowling, J.E. (1969) Organization of the primate retina-  
light microscopy.  
Philosophical Transactions of the Royal  
Society of London, Series B 255: 109-184
- Boycott, B.B., Wässle, H. (1991) Morphological classification of bipolar cells  
in the macaque monkey retina.  
European Journal of Neuroscience 3:  
1069-1088
- Brandt, T., Dichgans, J., Koenig, E. (1973) Differential effects of central versus peri-  
pheral vision on egocentric and exocentric  
motion perception.  
Experimental Brain Research 16: 476-491
- Braun, J., Sagi, D. (1990) Vision outside the focus of attention.  
Perception and Psychophysics, 48(1): 45-48

- Britten, K.H. (1996) Attention is everywhere.  
Nature Aug. 8 382 (6591): 497-498
- Bronstein, R.F., Pittmann, T.S. (1992) Perception Without Awareness.  
Guilford Press, New York
- Chaparro, A., Young, S.L. (1993) Reading with rods-the superiority of central vision for rapid reading.  
Investigative Ophthalmology & Visual Science 34 (7): 2341-2347
- Chun, M.M., Marois, R. (2002) The dark side of visual attention.  
Current Opinion in Neurobiology 12 (2): 184-189
- Crick, F., Koch, C. (1995) Are we aware of neural activity in primary visual cortex?  
Nature May 11 375 (6527): 121-123
- Curcio, C.A., Sloan, K.R., Kalina, R.E., Hendrickson, A.E. (1990) Human photoreceptor topography.  
Journal of Comparative Neurology 292: 497-523
- Desimore, R. (1998) Visual attention mediated by biased competition in extrastriate visual cortex.  
Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B Biological sciences 353: 1245-1255
- Dichgans, J., Brandt, T. (1978) Visual-vestibular interaction: Effects on self-motion perception and postural control.  
In: Held, R., Leibowitz, H., Teuber, H.-L. Handbook of Sensory Physiology 8: 755-804
- Eppstein, R., Kanwisher, N. (1998) A cortical representation of the local visual environment.  
Nature Apr. 9 392 (6676): 598-601
- Erco Light Scout (2004) [http://www.erco.com/en\\_index.htm?http://www.erco.com/~klickmeister/km\\_ls\\_glossar/suche.pl?sprache=de&modus=index](http://www.erco.com/en_index.htm?http://www.erco.com/~klickmeister/km_ls_glossar/suche.pl?sprache=de&modus=index)  
20.12.2004 16:35

- Fahle, M., Schmid, M. (1988) Naso-temporal asymetry of visual perception and of the visual cortex. *Vision Research* 28 (2): 293-300
- Fahle, M. (1991) Sinnesphysiologie der Überauflösung Wahrnehmung jenseits des Photorezeptorendurchmessers. Enke Verlag Stuttgart
- Fechner, G.T. (1860) *Elemente der Psychophysik*. Leipzig
- Fendrich, R., Wessinger, C.M., Gazzaniga, M.S. (1992) Residual vision in scotoma: implications for blindsight. *Science* Nov. 28 5 (5087): 1489-1491
- Funahashi, S., Bruce, C.J., Goldman-Rakic, P.S. (1993) Dorsolateral prefrontal lesions and oculomotor delayed-response performance: evidence of mnemonic scotomas. *Journal of Neuroscience* 13:1479-1497
- Georgeson, M.A., Sullivan, G. (1975) Contrast constancy: deblurring in human vision by spatial frequency channels. *Journal of Physiology* 252: 627-656
- Goldberg, M.E., Bushnell, M.C. (1981) Behavioural enhancement of visual responses in monkey visual cortex. II: Modulation in frontal eye fields specifically related to saccades. *Journal of Neurophysiology* 46: 773-787
- Greger, R., Windhorst, U. (1996) *Comprehensive human physiology- from cellular mechanisms to integration*. Springer Verlag Heidelberg
- Harris, J.P., Fahle, M. (1996) Differences between fovea and periphery in the detection and discrimination of spatial offsets. *Vision Research* 36 (21): 3469-3477
- Hess, R.F., Sharpe, L.T., Nordby, K. (1990) *Night Vision—basic, clinical and applied aspects*. Cambridge University Press
- Ingram, J.N. (2002) Consciousness- just more of the same in the visual brain. *Trends in Cognitive Sciences* 6 (10):412

- Jurklies, B., Jurklies, C., Schmidt, U., Wessing, A., Bornfeld, N. (2001) Kristalline korneoretinale Dystrophie (Bietti) -Langzeitverlauf von einem Patienten von 30 Jahren und interindividuelle Variabilität klinischer und elektro-physiologischer Befunde von zwei Patienten. *Klinisches Monatsblatt Augenheilkunde* 218 (8): 562–569
- Kastner, S., De Weerd, P., Desimore, R., Ungerleider, L.G. (1998) Mechanisms of directed attention in the human extrastriate cortex as revealed by functional MRI. *Science* 282: 108-111
- Koch, C., Braun, J. (1996) Towards the neuronal correlate of visual awareness. *Current Opinion in Neurobiology* Apr. 6 (2): 158-164
- Kyuk, T., Elliot, J.L. (1999) Visual factors and mobility in persons with age related macular degeneration. *Journal of Rehabilitation Research and Development* 36 (4):303-312
- Kolb, F.C., Braun, J. (1995) Blindsight in normal observers. *Nature*, Sept. 28 377 (6547): 336-368
- Lachenmayr, B. (2003) Anforderungen an das Sehvermögen des Kraftfahrers. *Deutsches Ärzteblatt* 100: A 624-634
- Lennie, P., Fairchild, M.D. (1994) Ganglion cell pathways for rod vision. *Vision Research* 34 (4): 477-482
- Livingstone, M.S., Hubel, D.H. (1988) Do relative mapping densities of the magno-and parvocellular systems vary with excentricity? *Journal of Neuroscience* 8 (11): 4334-4339
- Mallot, H.A. (2000) Sehen und die Verarbeitung visueller Information. Vieweg Verlagsgesellschaft Wiesbaden
- Milner, A.D. (1995) Cerebral correlates of visual awareness. *Neuropsychologia* 33 (9) :1117-1130

- Milner, A.D., Goodale, M.A. (1995) Visual Brain in Action.  
Oxford University Press
- Merigan, W.H., Maunsell, J.H.R. (1993) How parallel are the primate visual pathways? Annual Reviews of Neuroscience 16: 369-402
- Merikle, P.M., Reingold, E.M. (1992) Measuring unconscious perceptual processes. In: Bronstein, P.F., Pittmann, T.S.: Perception Without Awareness. Guilford Press New York.
- Moutoussis, K., Zeki, D. (2002) The relationship between cortical activation and perception investigated with invisible stimuli.  
Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 99 (14): 9527-9532
- Okano, T., Kojima, D., Fukada, Y., Shichida, J., Yoshisawa, T. (1992) Primary structures of chicken cone visual pigments: Vertebrate rhodopsins have evolved out of cone visual pigments. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 89: 5932-5936
- Owsley, C., Mc Gwin, G. (1999) Vision impairment and driving. Survey of Ophtamology 43 (6): 535-547
- Perenin, M.T., Rosetti, Y. (1996) Grasping without form discrimination in a hemianopic field. Neuro Report 7: 793-797
- Pohl, R.W.(1976) Optik und Atomphysik, 13. Auflage  
Springer Verlag, Berlin
- Rasmussen, J. (1980) The human as a system component.  
In: Human Interaction with Computers  
Eds: Smith, H.T., Green, G.  
Academic Press London
- Rassow, B. (1999) Einfluß der Leuchtdichte auf Kontrast- und Blendungsempfindlichkeit im mesopischen Bereich.  
Klinisches Monatsblatt Augenheilkunde 214: 401-406

- Rees, G., Lavie, N. (2001) What can functional imaging reveal about attention?  
*Neuropsychologia* 39: 1343 - 1353
- Riddoch, G. (1917) Dissociation of visual perceptions due to occipital injuries, with especial reference of appreciation of movement.  
*Brain* 40: 15-57
- Rumar, K. (1990) The basic driver error: Late detection  
*Ergonomics* 33 (10/11): 1281-1290
- Saarinen, J., Julesz, B. (1991) The speed of attentional shifts in the visual field.  
*Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 88 (5): 1812-1814
- Sagi, D., Tanne, D. (1994) Perceptual learning: Learning to see.  
*Current opinion in Neurobiology* 4:195-199
- Sahraie, D., Weiskrantz, L., Trevelyan, C. T., Cruce, R., Murray, A. D. (2002) Psychophysical and pupillometric study of spatial channels of visual processing in blindsight.  
*Experimental Brain Research* 143 (2): 249-256
- Savage, G.L., Banks, S.M. (1992) Scotopic visual efficiency: Constraints by optics, receptor properties and rod pooling.  
*Vision Research* 32 (4): 465-656
- Schiller, P.H. (1992) The ON and OFF channels of the visual system.  
*Trends Neuroscience* 15 (3): 86-92
- Schiller, P.H.; Logothetis, N.K. (1990) The color opponent and broad band channels of the primate visual system.  
*Trends Neuroscience* (10): 392-398
- Schneider, W., Schiffrin, R.M. (1977) Controlled and automatic human information processing: I. Detection, search and attention.  
*Psychological Review* 84:1-66



- Schmidt, R.F., Birbaumer, N. (1998) Neuro- und Sinnesphysiologie  
3. Auflage Springer Verlag Berlin
- Schultze, M. (1866) Zur Anatomie und Physiologie der Retina.  
Arch. Mikrosk. Anat. Entw. Mech.2:  
175-286
- Sivak, B., Mac Kenzie, C.L. (1990) Integration of visual information and motor  
output in reaching and grasping: The contri-  
butions of peripheral and central vision.  
Neuropsychologia 28 (10): 1095-1116
- Solomon, J.A., Sperling, G. (1995) 1<sup>st</sup> and 2<sup>nd</sup> order motion and texture  
resolution in central and peripheral vision.  
Vision Research 35 (1): 59-64
- Spillman, L., Ramson-Hogg, A  
Ohler, R. (1987) A comparison of perceptive and receptive  
fields in man and monkey.  
Human Neurobiology 6: 51-62
- Thorpe, S.J., Gegenfurtner, K.L.  
Fabre-Thorpe, M., Bülthoff, H.H (2001) Detection of animals in natural images  
using far peripheral vision.  
European Journal of Neuroscience  
14: 869-876
- Trevarthen, C.B. (1968) Two mechanisms of vision in primates.  
Psychologische Forschung 31 (4): 299-348
- Ungerleider, L.G., Mishkin, M. (1982) Two cortical visual systems.  
In: Analysis of visual behaviour. Edited by  
Ingle, D.J., Goodale, M.A., Mansfield,  
J.R.W.  
Cambridge, Massachusetts MIT Press:  
549-585
- Ungerleider, L.G., Kastner, S. (2000) Mechanisms of visual attention in the  
human cortex.  
Annual Review of Neuroscience 23:  
315-341
- Van Essen, D.C., Maunsell J.H.R. (1984) Hierarchical organization and functional  
streams in the visual cortex.  
Trends Neuroscience 6: 370-375
- Van Essen, D.C., Anderson, C.H.,  
Felleman, D.J. (1992) Information processing in the primate visual  
system: an integrated systems perspective.  
Science 255 (5043): 419-423

- Viestenz, A., Shin, Y.S.,  
Viestenz, A. (2002) Okuläre Manifestation bei Mukopolysaccharidose I–S (Scheie–Syndrom).  
Kinesisches Monatsblatt Augenheilkunde  
219 (10): 745–748
- Wandell, B.A. (1995) Foundations of Vision.  
Sunderland, Massachusetts  
Sinauer Associates
- Warren, W.H., Kurtz, K.J. (1992) The role of central and peripheral vision in  
perceiving the direction of self motion.  
Perception & Psychophysics (5) :443-454
- Wässle, H., Grünert, U., Röhrenbeck, J.  
Boycott, B. (1989) Cortical magnification factor and the ganglion cell density in the primate.  
Nature Oct. 19 341 (6243): 643-646
- Weiskrantz, L. (1998) Blindsight: a case study and implications.  
2<sup>nd</sup> edition. Oxford University Press Oxford
- Williamson, S.J., Cummins, H.Z. (1983) Light and Color in Nature and Art.  
New York Wiley
- Whitaker, D., Latham, K.,  
Mäkelä, P., Rovamo, J. (1993) Detection and Discrimination of  
curvature in foveal and peripheral vision.  
Vision Research 33 (16): 2215-2224
- Zeki, S., Ffytche, D.H. (1998) The Riddoch Syndrome: Insights into the  
neurobiology of conscious vision.  
Brain 121: 25-45
- Zeki, S. (2001) Localization and Globalization in  
Conscious vision.  
Annual Review of Neuroscience 24: 57-86
- Zeman, A. (2001) Consciousness. Brain 124: 1263-1289

# **Anhang**

## **A - I**



Nr. grün	Nr. rot	Nr. schwarz	Nr. blau	Farbe	Form	Länge × Breite	Höhe	Höhenklasse
6	44	79	1	weiss	Quader	2,5×17,0	3,5	1
66	6	72	2	dunkelgrau	Kegel	Ø 13,5	7,0	1
17	60	93	3	hellgrau	Quader	4,0×10,5	2,0	1
40	14	65	4	mittelgrau	Quader	6,0×10,0	2,0	1
15	17	36	5	hellgrau	Quader	10,0×23,0	29,5	4
7	10	69	6	weiss	Quader	15,0×18,0	8,0	1
2	76	57	7	mittelgrau	Quader	7,0×11,0	18,0	3
3	13	70	8	weiss	Quader	3,0×10,0	9,0	2
4	9	100	9	hellgrau	Quader	4,0×16,5	3,0	1
10	62	28	10	weiss	Quader	5,0×23,0	30,0	4
70	67	45	11	dunkelgrau	Kegel	Ø 12,0	7,0	1
1	35	98	12	weiss	Quader	4,0×17,0	23,0	3
8	42	6	13	mittelgrau	Quader	29,0×21,5	10,0	2
5	57	88	14	mittelgrau	Kugel	U 23,5	157,5	5
89	19	14	15	weiss	Kegel	Ø 4,5	12,0	2
67	99	38	16	dunkelgrau	Kugel	15,5×19,0	6,0	1
64	5	95	17	hellgrau	Kugel	U 67,0	11,0	2
96	90	75	18	dunkelgrau	Kegel	Ø 9,0	18,0	3
47	12	59	19	hellgrau	Quader	23,0×30,0	24,5	4
93	65	80	20	mittelgrau	Quader	7,5×14,5	16,0	2
88	3	86	21	dunkelgrau	Kugel	U 45,0	14,0	2
94	55	12	22	mittelgrau	Kegel	Ø 17,0	18,5	3
98	31	91	23	mittelgrau	Kegel	Ø 25,0	15,0	2
76	70	50	24	mittelgrau	Kugel	U 37,5	11,0	2
92	66	20	25	weiss	Kugel	Ø 6,5	20,0	3
22	53	90	26	dunkelgrau	Quader	8,0×12,5	10,0	2
78	4	15	27	hellgrau	Quader	9,5×15,0	30,0	4
100	63	42	28	hellgrau	Quader	6,5×15,5	5,0	1
87	48	11	29	weiss	Kegel	Ø 15,0	12,0	2
91	1	26	30	mittelgrau	Quader	3,0×48,0	0,1	1
46	64	33	31	hellgrau	Quader	26,5×30,0	41,5	5
84	54	40	32	hellgrau	Quader	7,0×21,0	24,0	3
97	2	58	33	mittelgrau	Kugel	U 67,0	27,0	4
79	45	94	34	weiss	Quader	5,0×14,0	19,0	3
63	46	19	35	mittelgrau	Kugel	Ø 10,0	62,5	5

81	8	56	36	mittelgrau	Quader	Ø 2,5	6,0	1
82	68	4	37	dunkelgrau	Kugel	U 86,5	25,0	4
80	39	74	38	hellgrau	Quader	5,5×9,0	13,0	2
83	16	18	39	hellgrau	Kegel	Ø 29,0	16,5	2
51	49	66	40	hellgrau	Quader	18,0×23,0	39,0	5
48	20	96	41	hellgrau	Kegel	Ø 8,0	4,0	1
9	75	25	42	dunkelgrau	Quader	10,0×26,0	33,0	4
72	82	51	43	hellgrau	Quader	8,0×12,0	23,0	3
24	56	85	44	mittelgrau	Kegel	Ø 10,0	24,5	4
14	88	55	45	hellgrau	Quader	5,0×5,0	12,0	2
37	37	37	46	dunkelgrau	Quader	7,0×19,0	23,0	3
39	84	76	47	weiss	Kugel	U 40,0	14,0	2
61	59	52	48	dunkelgrau	Kugel	U 99,0	10,0	2
20	61	29	49	mittelgrau	Kugel	U 106,0	36,0	5
12	41	97	50	dunkelgrau	Quader	27,0×39,0	33,0	5
44	51	3	51	mittelgrau	Kegel	Ø 9,5	12,5	2
42	50	5	52	weiss	Quader	18,0×24,0	31,0	4
26	73	35	53	dunkelgrau	Kugel	U 73,0	6,0	1
36	7	53	54	weiss	Quader	12,5×25,5	57,5	5
23	100	13	55	dunkelgrau	Kugel	U 23,5	157,5	5
57	40	44	56	hellgrau	Quader	18,0×29,0	84,0	5
95	74	39	57	weiss	Kegel	Ø 15,5	19,0	3
85	77	46	58	hellgrau	Kegel	Ø 5,5	19,0	3
52	80	43	59	mittelgrau	Quader	17,0×26,0	18,0	3
27	89	54	60	hellgrau	Kegel	Ø 9,0	21,5	3
32	91	63	61	mittelgrau	Quader	5,0×26,0	26,0	4
13	95	62	62	hellgrau	Kegel	Ø 12,0	30,0	4
31	81	99	63	mittelgrau	Quader	10,0×17,0	28,5	4
41	94	7	64	weiss	Quader	4,0×10,0	17,0	3
19	71	16	65	mittelgrau	Kegel	Ø 6,0	10,0	2
11	69	30	66	weiss	Kegel	Ø 8,0	18,0	3
74	85	23	67	mittelgrau	Quader	5,0×18,5	25,5	4
38	79	17	68	dunkelgrau	Kugel	U 109,5	35,0	5
29	78	32	69	dunkelgrau	Kegel	Ø 8,0	25,5	4
28	98	9	70	dukelgrau	Kegel	Ø 9,0	20,5	3
30	72	41	71	mittelgrau	Kegel	Ø 11,0	29,0	4

35	30	2	72	dunkelgrau	Kegel	Ø 12,0	30,0	4
60	97	71	73	weiss	Kegel	Ø 13,0	35,0	5
34	26	34	74	weiss	Quader	9,0x9,0	30,0	4
18	93	8	75	dunkelgrau	Quader	10,0x17,0	28,0	4
25	27	21	76	weiss	Kegel	Ø 14,0	30,0	4
54	43	24	77	mittelgrau	Kugel	U 64,0	23,0	3
56	32	31	78	dunkelgrau	Quader	30,0x25,0	66,0	5
21	28	60	79	dunkelgrau	Quader	12,0x17,0	33,0	5
68	22	47	80	weiss	Kegel	Ø 19,0	35,0	5
16	47	48	81	dunkelgrau	Quader	7,5x46,5	0,6	1
33	33	1	82	weiss	Quader	21,0x24,0	31,5	5
90	24	49	83	hellgrau	Kegel	Ø 20,0	36,0	5
43	52	82	84	weiss	Kugel	U 37,0	24,0	3
58	38	61	85	hellgrau	Quader	12,0x17,5	10,0	2
77	29	87	86	dunkelgrau	Quader	5,5x10,5	8,0	1
50	92	89	87	hellgrau	Quader	18,0x25,5	0,3	1
71	96	78	88	weiss	Kegel	Ø 18,0	100,0	5
59	18	64	89	mittelgrau	Quader	19,0x23,0	33,0	5
55	21	10	90	dunkelgrau	Kugel	U 32,0	10,0	2
65	25	22	91	hellgrau	Kegel	Ø 21,0	6,0	1
75	83	84	92	weiss	Kegel	Ø 14,5	6,5	1
49	58	27	93	dunkelgrau	Quader	22,5x30,0	24,5	4
53	15	68	94	weiss	Kugel	U 51,0	6,5	1
62	36	83	95	hellgrau	Quader	11,5x19,0	11,5	2
69	87	81	96	dunkelgrau	Kegel	Ø 6,5	20,0	3
86	34	92	97	mittelgrau	Quader	4,0x9,0	21,5	3
73	86	77	98	mittelgrau	Quader	33,5x46,0	58,5	5
45	23	67	99	hellgrau	Kegel	Ø 19,0	45,0	5
99	11	73	100	weiss	Kegel	Ø 6,0	4,0	1

Tabelle A1: Hindernismasse und Eigenschaften im Versuch (Angabe von Länge und Breite sowie Höhe in cm)

## Anhang D

### Versuchstag 1: blau (Angabe der Koordinaten in cm)

S	Nr.	K	S	Nr.	K	S	Nr.	K	S	Nr.	K	S	Nr.	K
1	1	X=267 Y=28,5	3	21	X=173 Y= 63	5	41	X=143,5 Y=156	8	61	X=79 Y=76	11	81	X=42 Y=68
1	2	X=207,5 Y=17,5	3	22	X=210 Y=93	6	42	X=61 Y=170	9	62	X=101,5 Y=7	11	82	X=137 Y=145,5
1	3	X=143 Y=25,5	3	23	X=71 Y=98	6	43	X=153 Y=21	9	63	X=79 Y=48,5	11	83	X=61,5 Y=117,5
1	4	X=75,5 Y=57	3	24	X=155 Y=168	6	44	X=177 Y=80,5	9	64	X=20,5 Y=33,5	11	84	X=84 Y=170,5
1	5	X=151 Y=86	3	25	X=96 Y=166	6	45	X=101 Y=74	9	65	X=45 Y=56	12	85	X=187 Y=32
1	6	X=80 Y=81	4	26	X=160 Y=145	6	46	X=36,5 Y=69	9	66	X=70,5 Y=73,5	12	86	X=93 Y=38,5
1 K	7	X=24 Y=8	4	27	X=74 Y=26	6	47	X=110 Y=10,5	9	67	X=22 Y=74,5	12	87	X=43 Y=50,5
1 K	8	X=80 Y=8	4 R1	28	X=92,5 Y=24,5	6	48	X= 185 Y=136	9	68	X=80 Y=17,5	12	88	X=105,5 Y=77,5
1 K	9	X=120 Y=8	4 R1	29	X=56 Y=24,5	6	49	X=73 Y=138	9 T41	69	X=28 Y=18,5	12	89	X=27 Y=104
1 K	10	X=48 Y=32	4 R1	30	X=11,8 Y=311	6	50	X=142,5 Y=160,5	9 T41	70	X=94,5 Y=20,5	12	90	X=130,5 Y= 90
1 K	11	X=104 Y=32	4 R1	31	X=76 Y=33	7	51	X=131 Y=221	9 T31	71	X=40,5 Y=11,5	12	91	X=184 Y=101
1 K	12	X=96 Y=40	5 T31	32	X=38 Y=22,5	7	52	X=64 Y=20	9 T21	72	X=98 Y=10	12	92	X=105 Y=65
2	13	X=117,5 Y=29,,5	5 T31	33	X=75 Y=20,5	7	53	X=37 Y=9,5	10 T21	73	X=58 Y=23	13	93	X=140 Y=35,5
2	14	X=187 Y=86,5	5 T31	34	X=145,5 Y= 14	7	54	X=163 Y=94,5	10	74	X=92 Y=60,5	13	94	X=77 Y=56,5
2	15	X=153 Y=105	5 T21	35	X=86 Y=218	7	55	X=75 Y=86	10	75	X=176,5 Y=88,5	13	95	X=27 Y=95,5
2	16	X=225 Y=139	5 T21	36	X=60 Y=17	7	56	X=111 Y=159	10	76	X=142 Y=115	13	96	X=31 Y=225
2	17	X=137 Y=150	5 T21	37	X=29 Y=27	7	57	X=56 Y=126	10	77	X=90,5 Y=114	13	97	X=33,5 Y=74
2	18	X=52,5 Y=171	5	38	X=58 Y=112,5	8	58	X=50 Y=5	10	78	X=42 Y=101,5	13	98	X=120 Y= 81
3	19	X=234 Y=30	5	39	X=130 Y=100,5	8	59	X=67 Y=36	11	79	X=97 Y=165	13	99	X=64 Y=130
3	20	X=155 Y=4	5	40	X=180 Y=132	8 R1	60	X=42 Y=58	11	80	X=151 Y=41	13	100	X=97 Y=167



## Anhang E

### Versuchstag 2: schwarz

S	Nr.	K	S	Nr.	K	S	Nr.	K	S	Nr.	K	S	Nr.	K
1	1	X=18,5 Y=18,5	3	21	X=274 Y=122	6	41	X=9 Y=87	8	61	X=26 Y=144	10 T42	81	X=86 Y=21
1	2	X=222 Y=10,5	3	22	X=242 Y=108	6	42	X=33,5 Y=98	8	62	X=49 Y=88	10 T4	82	X=48 Y=29,5
1 R1	3	X=34 Y=68	3	23	X=205 Y=148	6	43	X=30,5 Y=113	8	63	X=87 Y=128	T31	83	X=90 Y=20
1 R1	4 R	X=34 Y=30,5	3	24	X=108,5 Y=170	6	44	X=68,5 Y=46,5	8	64	X=124 Y=166	11 T31	84	X=24 Y=13
1 R1	5	X=82 Y=76	3	25	X= 0,0 Y=63	6	45	X=130 Y=60	8	65	X=136,5 Y=125	11 T27	85	X=47 Y=3
1 R1	6	X=71 Y=41,5	4	26	X=22 Y=13	6 K	46	X=183 Y=8	8	66	X=112 Y=60	11 T21	86	X=102 Y=22,8
2 R1	7	X= 117,5 Y=59	4	27	X=51 Y=158	6 K	47	X=125 Y=16	8	67	X=154 Y=131	11 T21	87	X=14 Y=24,5
2 R2	8	X=21 Y=18	4	28	X=61 Y=28	6 K	48	X=25 Y=8	8	68	X=160 Y=50	11	88	X=117 Y=161,5
2 R2	9	X=37 Y=81	4	29	X=110 Y=115	7 K	49	X=75 Y=48	9	69	X=47 Y=100	11	89	X=111,5 Y=103
2 R2	10	X=59 Y=47	5	30	X=123 Y=59	7 K	50	X=158 Y=64	9	70	X=41 Y=47	11	90	X=169 Y=144
2 R2	11	X=82 Y=88	5	31	X=165 Y=161	7 K	51	X=175 Y=48	9	71	X=77 Y=142	11	91	X=142 Y=87,5
2	12	X=176 Y=48	5	32	X=20 Y=97	7 T	52	X=73 Y=22	9	72	X=32 Y=93	11	92	X=146 Y=33
2	13	X=130 Y=65	5	33	X=115 Y=42,5	7 T	53	X=170 Y=53	9	73	X=91 Y=23,5	12	93	X=5 Y=111,5
2	14	X=97 Y=72	5	34	X=99 Y=140	7 T	54	X=48 Y=69	9	74	X=58,5 Y=8	12	94	X=8,5 Y=48
2	15	X=73 Y=88	5	35	X=101 Y=74	7 T	55	X=172 Y=60	9	75	X=16 Y=8	12	95	X=34 Y=169
2	16	X=208 Y=16	5	36	X=140 Y=134	7	56	X=100 Y=93,5	10	76	X=68 Y=20,5	12	96	X=40,5 Y=100
3	17	X=238 Y=41	5	37	X=147 Y=85	7	57	X=79 Y=138,5	10	77	X=60 Y=25	12	19 7	X=57,5 Y=23,5
3	18	X=185,5 Y=43	5	38	X=172,5 Y=37	7	58	X=117 Y=81	10	78	X=34 Y=31,5	12	98	X=96 Y=114
3	19	X=127 Y=60,5	6	39	X=25,5 Y=171	7	59	X=58 Y=101	10	79	X=86 Y=83	13	99	X=103 Y=16,5
3	20	X=104 Y=31,5	6	40	X=20 Y=128	7	60	X=176,5 Y=130	10	80	X=35 Y=81	13	10 0	X=115,5 Y=51

## Anhang F

### Versuchstag 3: rot

S22	Nr	K	S22	Nr	K	S22	Nr.	K	S22	Nr	K	S22	Nr	K
1	1	X=8 Y=110	3	21	X=144 Y=58	6	41	X=147 Y=22	8	61	X=69 Y=16	10	81	X=97,5 Y=79
1	2	X=56,5 Y=96,5	3	22	X=241 Y=102	6	42	X=72 Y=38,5	8	62	X=164 Y=58,5	10	82	X=135 Y=178,5
1 T21	3	X=94 Y=17	3	23	X=188 Y=124	6	43	X=145 Y=46	8	63	X=82 Y=62	10	83	X=138 Y=145
1 T21	4	X=40 Y=10	3	24	X=145 Y=166	6	44	X= 90,5 Y=106,5	8	64	X=23 Y=78	10	84	X=144,5 Y=66
1 T31	5	X=35,5 Y=8	3	25	X=264 Y=132	6	45	X=104 Y=120	8	65	X=98 Y=118	10	85	X=178,5 Y=162
1 T31	6	X=70,5 Y=6	4	26	X=82 Y=14	6	46	X=132,5 Y=201,5	9	66	X=86 Y=28,5	11	86	X=12,5 Y=75
2 T41	7	X=86 Y=10,5	4	27	X=41 Y=32,5	6	47	X=120 Y=63,5	9	67	X=60 Y=42	11	87	X=49 Y=171
2 T41	8	X=22,5 Y=42	4	28	X=162,5 Y=31,5	6	48	X=119 Y=32	9	68	X=22 Y=43	11	88	X=113 Y=158
2 T41	9	X=16,5 Y=17	4	29	X=97,5 Y=56,5	7	49	X=65 Y=158,5	9	69	X=103 Y=54,5	11	89	X=109 Y=96
2 T31	10	X=91 Y=15	4	30	X=160,5 Y=57,5	6	50	X=175,5 Y=104	9	70	X=75 Y=90	11	90	X=77 Y=33,5
2 T31	11	X=81 Y=32,5	4	31	X=107 Y=97	6	51	X=171 Y=51	8	71	X=31 Y=94	11	91	X=168 Y=180
2 T31	12	X=27 Y=16,5	4	32	X=42 Y=141,5	7	52	X=50 Y=98,5	9	72	X=69 Y=15	11	92	X=160,5 Y=102
2 T31	13	X= 25 Y=32	5	33	X=157 Y=1,5	7	53	X=34,5 Y=43,5	9	73	X=23 Y=19	12	93	X=133 Y=8
2 T21	14	X=23 Y=34	5	34	X=148 Y=47	7	54	X=260,4 Y=68,5	9	74	X=87 Y=52,5	12	94	X=83 Y=16
2 T21	15	X=48 Y=130	5	35	X=86,5 Y=51,5	7	55	X=94 Y=90	9	75	X=30,5 Y=49	12	95	X=41,5 Y=48
2 T21	16	X=99 Y=27	5	36	X=49 Y=54,5	7	56	X=78,5 Y=65	9	76	X=55,5 Y=80	13	96	X=88 Y=46
3	17	X=99 Y=22	5	37	X=116 Y=87	7	57	X=139 Y=174	10	77	X=51,5 Y=20	13	97	X=121 Y=39,5
3	18	X=173 Y=30	5	38	X=34 Y=96	7	58	X=132 Y=98,5	10	78	X=30 Y=39	13	98	X=60 Y=24
3	19	X=184 Y=41	5	39	X=154 Y=76	7	59	X=132,5 Y=40	10	79	X=94,5 Y=26	13	99	X=159 Y=83
3	20	X=177 Y=76	5	40	X=136 Y=73	7	60	X=175,5 Y=151,5	10	80	X=40 Y=71,5	13	100	X=66 Y=74

## Anhang G

### Versuchstag 4: grün

S	Nr.	K	S	Nr.	K	S	Nr.	K	S	Nr.	K	S	Nr.	K
1	1	X=169 Y=23	3	21	X=84,5 Y=111	6	41	X=169 Y= 0,5	8	61	X=115,5 Y=135	11	81	X=95 Y=36
1	2	X=237 Y=38,5	3	22	X=188 Y=122	6	42	X=187 Y=26,5	8	62	X=61,5 Y=158	11	82	X=41 Y=61,5
1	3	X=213 Y=51,5	3	23	X=151,5 Y=120	6	43	X=72 Y=79,5	9	63	X=24 Y=33	11	83	X=123,5 Y=73,5
1	4	X=254 Y=90	3	24	X=102 Y=169,5	6	44	X=90 Y=94	9	64	X=52 Y=51	11	84	X=84,5 Y=143
1	5	X=201 Y=94,5	3	25	X=152 Y=158	6	45	X=16,5 Y=8	9	65	X=181,5 Y=67	12	85	X=738,5 Y=32,5
1	6	X=143 Y=113,5	4	26	X=102 Y=169,5	6	46	X=16,5 Y=65	9	66	X=129 Y=95	12	86	X=120 Y=48,5
1	7	X=278 Y=133,5	4	27	X=46 Y=49	6	47	X=66,5 Y=40	9	67	X=197 Y=130,5	12	87	X=36 Y=44
1	8	X=237 Y=148,5	4	28	X=34,5 Y=61	6	48	X=108 Y=16	9	68	X=148,5 Y=126,5	12	88	X=89,5 Y=92,5
2	9	X=201 Y=3	4	29	X=56 Y= 81	6	49	X=166,5 Y=32	9	69	X=125,5 Y=156	12	89	X=148 Y=120,5
2	10	X=160 Y=42	4	30	X=97 Y=97	7	50	X=55 Y=13	9	70	X=71 Y=162,5	12	90	X=105 Y=137,5
2	11	X=216 Y=79	5	31	X=85,5 Y=21	7	51	X=129 Y=51	10	71	X=152 Y=16	12	91	X=92 Y=11
2	12	X=153 Y=108	5	32	X=61 Y=16	7	52	X=89 Y=44	10	72	X=109 Y=16	12	92	X=35 Y=9
2	13	X=253 Y=103	4	33	X=105 Y=27	7	53	X=180 Y=92	10	73	X=78 Y=18,5	13	93	X=90 Y=14
2	14	X=248 Y=148	5	34	X=96 Y=14	7	54	X=116 Y=96	10	74	X=41 Y=17	13	94	X=60 Y=24,5
2	15	X=205 Y=162	5	35	X=46 Y=24	7	55	X=65 Y=92	10	75	X=161 Y=157,5	13	95	X=22 Y=19,0
3	16	X=223 Y=32	5	36	X=57 Y=18	7	56	X=40 Y=93	10	76	X=115 Y=91	13	96	X=77 Y=59
3	17	X=183 Y=8	5	37	X=32 Y=22,5	7	57	X=136 Y=2	10	77	X=24 Y=55,5	13	97	X=72 Y=40
3	18	X=253,5 Y=58	5	38	X=104 Y=125	7	58	X=64,5 Y=166,5	10	78	X=84,5 Y=121	13	98	X=23 Y=36
3	19	X=207 Y=68	5	39	X=100 Y=167	8	59	X=153 Y=54	10	79	X=124 Y=145,5	13	99	X=17 Y=7
3	20	X=138 Y=20	5	40	X=41 Y=163	8	60	X=128,5 Y=74,5	11	80	X=166 Y=16,5	13	100	X=58 Y=38

## Tabelle A 2: Hindernisposition im Parcours für die einzelnen Versuchstage

## Legende zu Tabelle A 2

**S** = Segment / Untereinheit

**Nr.** = Hindernisnummer

**K** = Koordinaten

<b>R1 = Rampe Teil 1</b>	<b>Maße ( in cm ):</b>	<b>121 x 121 x 41 ( Länge x Breite x Höhe)</b>
<b>R2 = Rampe Teil 2</b>	<b>Maße ( in cm ):</b>	<b>121 x 121 x 41 ( Länge x Breite x Höhe)</b>
<b>RM = Rampe Mitte</b>	<b>Maße ( in cm ):</b>	<b>120 x 125 x 41 ( Länge x Breite x Höhe)</b>
<b>T21 = Treppe (2 ×)</b>	<b>Maße ( in cm ):</b>	<b>44 x 121 x 21 ( Länge x Breite x Höhe)</b>
<b>T31 = Treppe (2 ×)</b>	<b>Maße ( in cm ):</b>	<b>45 x 121 x 31 ( Länge x Breite x Höhe)</b>
<b>T41 = Treppe</b>	<b>Maße ( in cm ):</b>	<b>45 x 121 x 41 ( Länge x Breite x Höhe)</b>
<b>K = Kies</b>	<b>Maße ( in cm ):</b>	<b>80 x 200 ( Länge x Breite)</b>
<b>T = Teppich</b>	<b>Maße ( in cm ):</b>	<b>80 x 200 ( Länge x Breite)</b>

# Anhang I

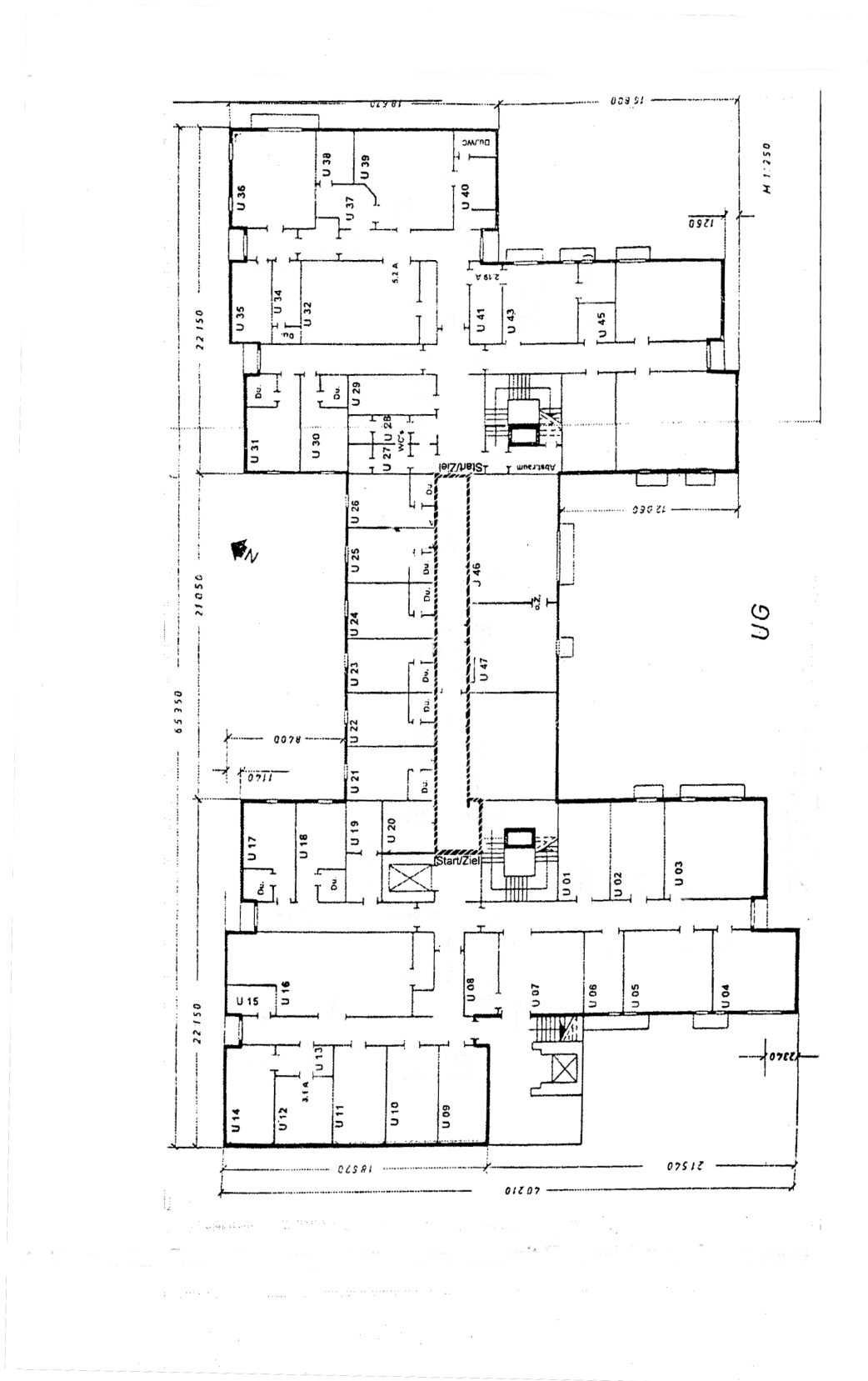


Abbildung A 1: Grundriss Kellergeschoss mit Markierung des Parcours



## **Dank**

Herrn Professor Fahle danke ich herzlich für die Überlassung des Themas und die Betreuung der Arbeit mit großer Geduld und vielen freundlichen Ermutigungen.

Den Mitarbeitern des ehemaligen Instituts für visuelle Sensorik danke ich für die gute Zusammenarbeit, für Tipps und Ratschläge, die weitergeholfen haben.

Insbesondere Herrn Marc Repnow für die Unterstützung bei der Enträtselung physikalischer Gesetzmäßigkeiten, Herrn Michael Herzog für das Korrekturlesen.

Herrn Professor Dietz vom Institut für medizinische Biometrie danke ich für die statistische Beratung. Herrn Professor Kirschfeld vom Max-Planck-Institut Tübingen danke ich für die Leihgabe des Fotomultipliers.

Großer Dank gilt den Probanden, die teilgenommen haben und mit denen die Durchführung des Experiments großen Spaß gemacht hat.

Freunden und Bekannten danke ich für die Unterstützung während der Fertigstellung der Arbeit. Ulrike danke ich für ihren schnellen Einsatz.

Mein besonderer Dank gilt Robert, ohne den diese Arbeit niemals fertig gestellt worden wäre.

Meiner Familie und insbesondere meiner Mutter danke ich für die Unterstützung, auf die ich immer zählen kann.

## Lebenslauf

**Stephanie Frederike Lightner, geb. Plaz**

07.09.1971 in Mutlangen (Ostalbkreis)

- 1978 - 1982** Grundschule Hohengehren  
**1982 - 1988** Realschule Oberesslingen, Abschluss Mittlere Reife  
**1988 - 1991** Lichtensterngymnasium Großsachsenheim, Abschluss Abitur
- 1991 - 1992** Freiwilliges Soziales Jahr im Seniorenwohnheim  
Louise Ebert, Heidelberg
- WS 1992** Studium der Biologie, Universität Tübingen  
**1993 – 1994** Studium der Medizin, vorklinischer Abschnitt, Universität Mainz  
**1995 - 2000** Studium der Medizin, klinischer Abschnitt, Universität Tübingen
- 7.11.2000** Studienabschluss, Dritter Abschnitt der ärztlichen Prüfung
- seit 1997** Dissertation bei Professor M. Fahle, ehem. Leiter der Abteilung  
für visuelle Sensorik, Universitäts-Augenklinik, Tübingen
- 11/2000 – 8/2001** Ärztin im Praktikum, Innere Medizin, James Paget Hospital,  
Great Yarmouth, Norfolk, Grossbritannien  
**9/2001 – 12/ 2002** Ärztin im Praktikum, Innere Medizin, Kreiskrankenhaus  
Sigmaringen
- seit Mai 2003** Assistenzärztin in Weiterbildung im Furtbachkrankenhaus,  
Klinik für Psychiatrie und Psychotherapie, Stuttgart
- seit Juli 2004** verheiratet mit Robert Peter Lightner