

Aus der Sektion für klinische und experimentelle Sinnesphysiologie  
der Klinik und Poliklinik für Augenheilkunde (Direktor: Prof. Dr. H. Thieme)  
der Medizinischen Fakultät der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

**Konventionelle Sehschärfe und Übersehschärfe:  
Vergleich photopischer und skotopischer Bedingungen**

**Dissertation**

zur Erlangung des Doktorgrades

Dr. med.

(doctor medicinae)

an der Medizinischen Fakultät

der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

vorgelegt von Philipp Hannes Victor Freundlieb

aus Krefeld

Magdeburg 2019

## **Bibliographische Beschreibung:**

Freundlieb, Philipp Hannes Victor:

Konventionelle Sehschärfe und Übersehschärfe: Vergleich photopischer und skotopischer Bedingungen. - 2019. - 77 Bl., 19 Abb., 8 Tab.

## **Kurzreferat:**

Die vorliegende Arbeit beschäftigte sich mit der klinisch geläufigen konventionellen Sehschärfe (VA) und der klinisch nicht so geläufigen Übersehschärfe (HA) und ist thematisch in die Vorexperimente und das Hauptexperiment gegliedert.

In den Vorexperimenten wurde eine Messmethode zur Bestimmung der VA und HA unter photopischen und skotopischen Leuchtdichtebedingungen entwickelt, indem der Einfluss verschiedener Messfaktoren (Sehtest, HA-Sehreiz, Messentfernung, Kontrastpolarität, Leuchtdichtebedingung und Messdurchgang) auf die Sehschärfe untersucht wurde. Der Sehtest (VA beziehungsweise HA) und die Leuchtdichtebedingung (photopische beziehungsweise skotopische Leuchtdichtebedingung) erwiesen sich als signifikante Einflussfaktoren der Sehschärfe. Die skotopische Messentfernung (0,5 beziehungsweise 1,0 Meter), die Kontrastpolarität (positive beziehungsweise negative Kontrastpolarität), der HA-Sehreiz (Zwei- beziehungsweise Drei-Balkenreizmethode) und der Messdurchgang (erster beziehungsweise zweiter Messdurchgang) erwiesen sich als nicht-signifikante Einflussfaktoren der Sehschärfe.

Im sich anschließenden Hauptexperiment wurden mithilfe der in den Vorexperimenten entwickelten Messmethodik die photopische und skotopische VA und HA an zehn Normalprobanden bestimmt: Im Mittel betrug die Dezimalsehschärfe für die photopische VA 1,34, für die photopische HA 14,42, für die skotopische VA 0,1 und für die skotopische HA 1,5. Erstmals wurden die vier Sehschärfebedingungen miteinander verglichen und das Verhältnis zur photopischen VA bestimmt: die photopische HA betrug das 10,7-fache, die skotopische VA das 0,1-fache und die skotopischen HA das 1,1-fache.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b><i>Abkürzungsverzeichnis</i></b> .....	<b>6</b>
<b>2</b>	<b><i>Einführung</i></b> .....	<b>7</b>
<b>2.1</b>	<b>Einleitende Worte</b> .....	<b>7</b>
<b>2.2</b>	<b>Das menschliche Sehsystem</b> .....	<b>8</b>
2.2.1	Auge und optischer Apparat.....	8
2.2.2	„Bildverarbeitung“ .....	9
2.2.3	Photopisches und Skotopisches Sehen .....	11
<b>2.3</b>	<b>Sehschärfebestimmung</b> .....	<b>11</b>
2.3.1	Konventionelle Sehschärfe (VA) .....	11
2.3.2	Übersehschärfe (HA).....	13
<b>2.4</b>	<b>Fragestellungen der Arbeit</b> .....	<b>17</b>
<b>3</b>	<b><i>Material und Methoden</i></b> .....	<b>18</b>
<b>3.1</b>	<b>Allgemeine Grundlagen des Messaufbaus</b> .....	<b>18</b>
3.1.1	Versuchspersonen.....	19
3.1.2	Sehschärfemessungen mit dem Freiburg Visual Acuity & Contrast Test .....	20
3.1.3	Messmethodik der konventionelle Sehschärfe (VA).....	21
3.1.4	Messmethodik der Übersehschärfe (HA) .....	22
3.1.5	Leuchtdichtebedingungen .....	23
3.1.6	Kontrastpolarität.....	24
<b>3.2</b>	<b>Beispielhafter Ablauf einer Messung</b> .....	<b>25</b>
<b>3.3</b>	<b>Sehschärfeauswertung</b> .....	<b>27</b>
<b>3.4</b>	<b>Einheiten der Sehschärfen</b> .....	<b>27</b>
<b>3.5</b>	<b>Statistik</b> .....	<b>29</b>
3.5.1	Allgemeine Statistik .....	29
3.5.2	Limits of Agreement (LOA).....	30

<b>4</b>	<b><i>Ergebnisse</i></b> .....	<b>31</b>
<b>4.1</b>	<b>Vorexperiment 1: Bestimmung einer geeigneten Dunkeladaptationszeit</b> .....	<b>31</b>
4.1.1	Einleitung .....	31
4.1.2	Lokale Methodik .....	32
4.1.3	Ergebnisse .....	32
4.1.4	Lokale Diskussion .....	33
<b>4.2</b>	<b>Vorexperiment 2: Erste Versuchsmessungen</b> .....	<b>33</b>
4.2.1	Einleitung .....	33
4.2.2	Lokale Methodik .....	33
4.2.3	Ergebnisse .....	34
4.2.4	Lokale Diskussion .....	35
<b>4.3</b>	<b>Vorexperiment 3: Skotopische Messungen für zwei Messentfernungen</b> .....	<b>36</b>
4.3.1	Einleitung .....	36
4.3.2	Lokale Methodik .....	36
4.3.3	Ergebnisse .....	37
4.3.4	Lokale Diskussion .....	38
<b>4.4</b>	<b>Vorexperiment 4: HA-Bestimmung mit der Drei-Balkenreizmethode</b> .....	<b>39</b>
4.4.1	Einleitung .....	39
4.4.2	Lokale Methodik .....	39
4.4.3	Ergebnisse .....	40
4.4.4	Lokale Diskussion .....	43
<b>4.5</b>	<b>Vorexperiment 5: HA-Bestimmung mit der Drei-Balkenreizmethode für zwei Kontrastpolaritäten</b> .....	<b>43</b>
4.5.1	Einleitung .....	43
4.5.2	Lokale Methodik .....	44
4.5.3	Ergebnisse .....	44
4.5.4	Lokale Diskussion .....	48
<b>4.6</b>	<b>Vorexperiment 6: Erneute Messung des Vorexperiments 5 unter einer zehnfach höheren Leuchtdichte</b> .....	<b>49</b>

4.6.1	Einleitung .....	49
4.6.2	Lokale Methodik .....	49
4.6.3	Ergebnisse .....	50
4.6.4	Lokale Diskussion .....	53
<b>4.7</b>	<b>Hauptexperiment: Messung der skotopischen VA und HA bei einer Leuchtdichte von 0,004 cd/m<sup>2</sup> und bei erhöhter Abbildungsqualität .....</b>	<b>54</b>
4.7.1	Einleitung .....	54
4.7.2	Lokale Methodik .....	54
4.7.3	Ergebnisse .....	55
4.7.4	Lokale Diskussion .....	60
<b>5</b>	<b><i>Diskussion</i> .....</b>	<b>63</b>
5.1	<b>Kurze Zusammenfassung der zentralen Punkte .....</b>	<b>63</b>
5.2	<b>Plausibilität der Ergebnisse .....</b>	<b>63</b>
5.3	<b>Limitationen der Arbeit .....</b>	<b>66</b>
5.4	<b>Relevanz der Arbeit im Rahmen der Sehforschung und der klinischen Anwendung .....</b>	<b>67</b>
<b>6</b>	<b><i>Zusammenfassung</i> .....</b>	<b>69</b>
<b>7</b>	<b><i>Literaturverzeichnis</i> .....</b>	<b>70</b>
<b>8</b>	<b><i>Danksagungen</i> .....</b>	<b>75</b>
<b>9</b>	<b><i>Ehrenerklärung</i> .....</b>	<b>76</b>
<b>10</b>	<b><i>Bildungsweg</i> .....</b>	<b>77</b>

## 1 Abkürzungsverzeichnis

AFC	Es gibt mehrere Antwortmöglichkeiten und es muss eine Antwort gegeben werden (englisch: alternativ forced choice)
ANOVA	mehrfaktorielle Varianzanalyse (engl. „analysis of variance“)
arcmin	Winkelminuten (englisch: arc-minute) [ $1^\circ = 60$ arcmin], Sehschärfereinheit
arcsec	Winkelsekunden (englisch: arc-second) [ $1$ arcmin = $60$ arcsec], Sehschärfereinheit
cd/m <sup>2</sup>	Candela pro Quadratmeter, Maßeinheit der Leuchtdichte
cm	Zentimeter, Maßeinheit der Distanz
CRT	Kathodenstrahlröhrenbildschirm (englisch cathode ray tube)
dpt	Dioptrie [ $1/m$ ], Maßeinheit der Brechkraft
decVA	Dezimalvisus [ $1/A$ ( $A$ in der Einheit arcmin)], Sehschärfereinheit
FrACT	Freiburger Visual Acuity und Contrast Test, computerbasierter Test zur Sehschärfebestimmung
HA	Übersehschärfe (englisch: hyperacuity)
LCD	Flüssigkristallanzeige (englisch: liquid crystal display)
logMAR	dekadisch logarithmierter minimaler Auflösungswinkel [ $\log\text{MAR} = -\log(\text{decVA})$ ] (englisch: logarithmic minimum angle of resolution), Sehschärfereinheit
m	Meter, Maßeinheit der Distanz
MW	Mittelwert, statistischer Parameter
P	p-Wert, statistischer Parameter
r	Korrelationskoeffizient nach Pearson, statistischer Parameter
s	Standardabweichung (englisch: standard deviation), statistischer Parameter
SEM	Standardmessfehler (englisch: standard error of the mean), statistischer Parameter
VA	konventionelle Sehschärfe, Visus (englisch: visual acuity)
°	Grad Sehwinkel, Sehschärfereinheit

## 2 Einführung

### 2.1 Einleitende Worte

Wie Johann Wolfgang von Goethe es in der Tragödie *Faust* formuliert, ist der Mensch „zum Sehen geboren“. Das Auge ist eines der wichtigsten Sinnesorgane des Menschen. Die Beeinträchtigung des Sehvermögens führt zu einer deutlichen Einschränkung der Lebensqualität, so geht zum Beispiel eine sehr starke Sehbeeinträchtigung mit einer Verschlechterung der Lebensqualität von etwa 60% einher und entspricht in etwa dem Zustand nach einem schweren Schlaganfall (Brown et al. 2005). Eine Abnahme des Funktionszustands des Auges geht mit einer Abnahme der Sehschärfe einher. Mithilfe von Sehtests lässt sich die Sehschärfe des Auges nichtinvasiv untersuchen und damit eine Aussage über den Funktionszustand des Auges treffen. Jeder Mensch ist seit der Kindheit mit Sehtests, bei denen sogenannte Sehzeichen in verschiedener Größe dargestellt werden, in Kontakt getreten. Es gibt jedoch nicht nur eine „Sehschärfe“, sondern wie in der Arbeit beschrieben, mehrere – unter anderem die klinisch und allgemein geläufige konventionelle Sehschärfe und die nicht so klinisch geläufige Übersehschärfe. Die konventionelle Sehschärfe gibt das Auflösungsvermögen des Abstands zweier Punkte zueinander an. Das Auflösungsvermögen der konventionellen Sehschärfe beträgt etwa eine Winkelminute und entspricht dem Erkennen eines drei Zentimeter großen Gegenstands aus 100 Metern Entfernung.

In dem bekannten Sketch „Das schiefe Bild“, geschrieben von Vicco von Bülow (alias Lorient), verwüstet der Hauptdarsteller ein Zimmer bei dem Versuch das „schiefe Bild“ gerade zu richten. Das menschliche Sehsystem besitzt die Fähigkeit die relative Position mindestens zweier Punkte zueinander, wie zum Beispiel der beiden Bildenden, zu detektieren. Diese Aufgabe wird von einer anderen Sehschärfe des menschlichen Sehsystems „bearbeitet“, der sogenannten Übersehschärfe. Der Name erklärt sich aus dem etwa zehnfach höheren Auflösungsvermögen der Übersehschärfe im Vergleich zur konventionellen Sehschärfe. Sowohl visuelle als auch kortikale Muster sind bei der Verarbeitung der Übersehschärfe beteiligt. Bisher haben sich vergleichsweise wenige Studien mit der Übersehschärfe beschäftigt, es fehlen Erkenntnisse bezüglich einer geeigneten Messmethodik zur verlässlichen Bestimmung der Übersehschärfe sowie Erkenntnisse über den Einfluss skotopischer Leuchtdichtebedingungen auf die Übersehschärfe. Die vorliegende Arbeit sollte neue Erkenntnisse in diesen Bereichen generieren. Hierzu wurde zunächst in mehreren aufeinander aufbauenden Vorexperimenten eine geeignete Messmethodik zur Bestimmung der beiden

Sehschärfen unter photopischen und skotopischen Leuchtdichtebedingungen entwickelt und getestet. Anschließend wurden mithilfe der entwickelten Messmethodik im Hauptexperiment Referenzdaten der konventionellen Sehschärfe und Übersehschärfe erhoben.

Der Abschnitt *Einführung* ist thematisch in zwei Teile gegliedert. Im ersten Teil werden, für das Verständnis der Arbeit, wichtige Grundlagen über das Auge und die Sehschärfen erläutert. Im zweiten Teil werden die Fragestellung sowie die Ziele der vorliegenden Arbeit formuliert.

## **2.2 Das menschliche Sehsystem**

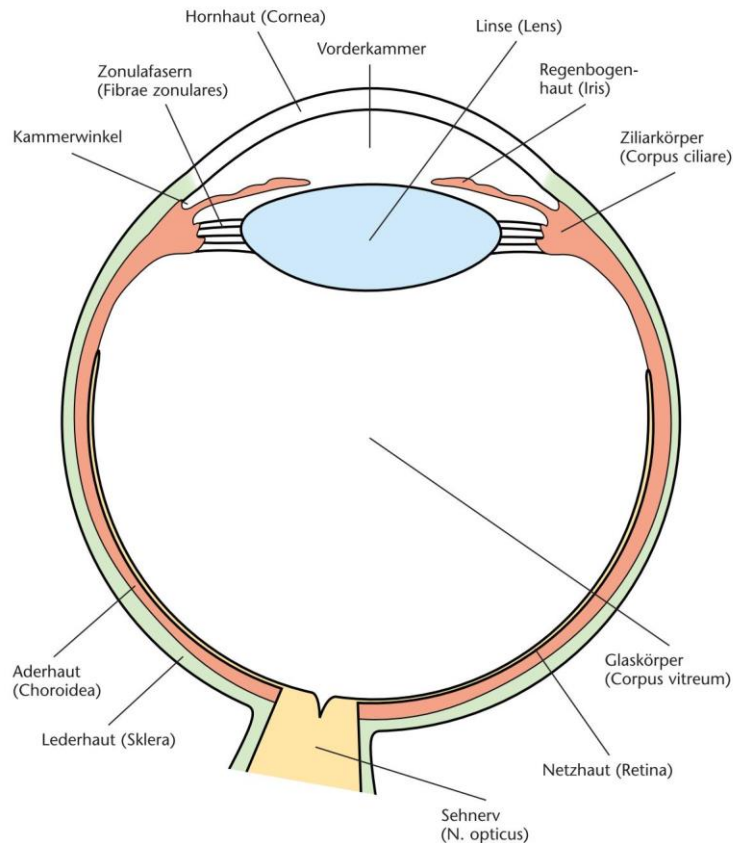
In diesem Abschnitt werden Grundlagen des menschlichen Sehsystems kurz zusammengefasst. Die Informationen sind folgenden Literaturquellen entnommen: Kellner (2008); Siegel und Sapru (2006); Grehn und Leydhecker (1995); Lang und Lang (2007) und Pocock und Richards (2006).

### **2.2.1 Auge und optischer Apparat**

Das menschliche Auge befindet sich in der Orbita und ist an der Vorderseite von den Lidern bedeckt. Das Auge besitzt einen dreischichtigen Aufbau, bestehend aus Sklera, Gefäßhaut und Netzhaut (*Abbildung 1*). Die Sklera bildet die äußere Schicht und besteht aus einem stabilen Kollagenfasergestützte, das die Stabilität des Auges gewährleistet. Die lichtundurchlässige Sklera geht im vorderen Augenbereich in die lichtdurchlässige Kornea (Hornhaut) über. Die mittlere Schicht (Uvea) wird gebildet aus Aderhaut (Choroidea), die der Ernährung der Netzhaut dient, dem Ziliarkörper und der Iris, die den Lichteinfall reguliert. Die innere Schicht wird von der Netzhaut (Retina) gebildet, die die Lichtimpulse in elektrische Signale umwandelt und über den Sehnerven in das Gehirn weiterleitet.

Gesehene Gegenstände werden von dem optischen Apparat als umgekehrtes, reelles und verkleinertes Bild auf die Netzhaut projiziert. Der optische Apparat besteht aus der Hornhaut, der vorderen Augenkammer und der Linse. Der Brechwert der Kornea beträgt etwa 43 Dioptrien (1/m) und der Brechwert der Linse beträgt, je nach Akkommodationszustand, zwischen 19 und 33 Dioptrien (Lang und Lang 2007). Mithilfe des Ziliarmuskels lässt sich der Krümmungsgrad und dementsprechend die Brechkraft der Linse regulieren.

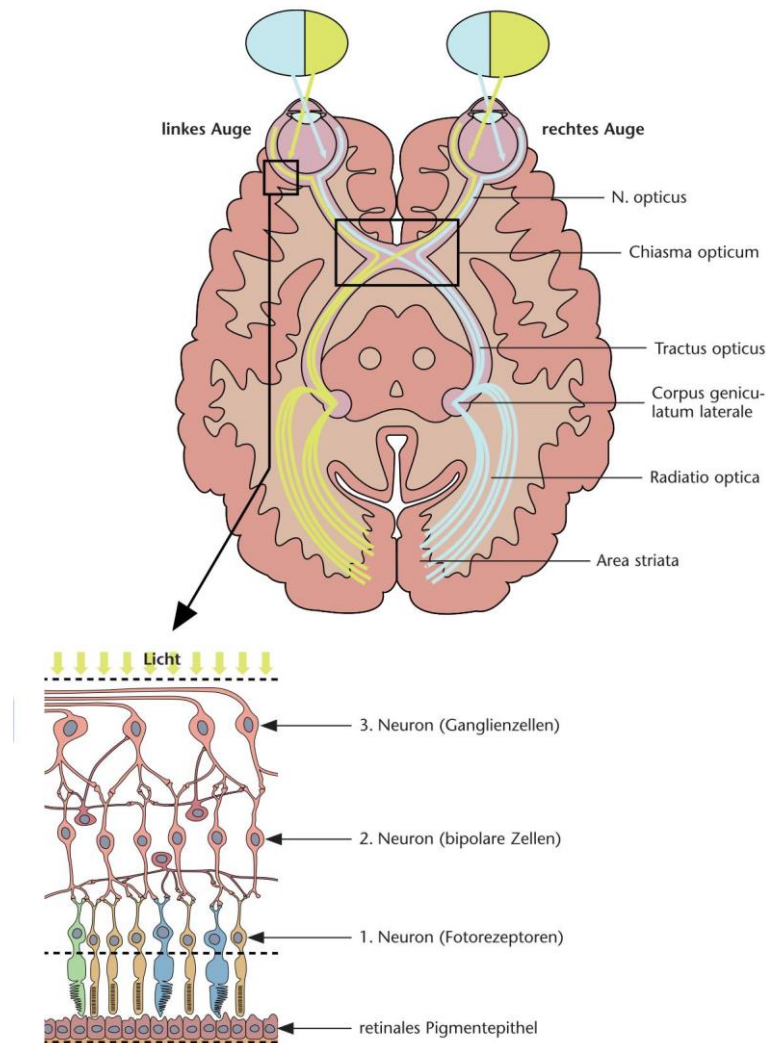




**Abbildung 1: Querschnitt des menschlichen Auges.** Auf der Abbildung sind die wichtigsten Strukturen des menschlichen Auges dargestellt. Eine ausführlichere Beschreibung des Aufbaus findet sich im oberen Textabschnitt (Rüping und Fetzner 2011).

### 2.2.2 „Bildverarbeitung“

Die Retina dient der Umwandlung der Lichtreize in neuronale Impulse, die über mehrere Stationen in den visuellen Cortex geleitet werden. Die Netzhaut besitzt einen mehrschichtigen Aufbau (*Abbildung 2*). Das Licht durchdringt die Netzhaut und reizt die in der äußersten Netzhautschicht liegenden Fotorezeptoren. Die Fotorezeptoren aktivieren die Bipolarzellen, die wiederum die Ganglionzellen reizen. Die Axone der Ganglionzellen bilden die Nervenfasern des Sehnervens, die größtenteils auf Ganglionzellen im Corpus geniculatum laterale umschalten (*Abbildung 2*). Vom Corpus geniculatum laterale werden die Sehinformationen zunächst in den primären visuellen Cortex (V1 oder Area striata) geleitet, von wo die Reize entsprechend ihres Informationsgehalts in das für diese Information spezifische höherer Cortexareal geleitet werden. So werden beispielweise Form und Farbe eines Gegenstandes unter anderem im Cortexareal V4 verarbeitet.



**Abbildung 2: Darstellung der „bildverarbeitenden“ Strukturen.** In der Abbildung sind die Netzhaut (Retina) und der Verlauf der Sehbahnen dargestellt. Die Skizze der Retina benennt die drei Neuronengruppen, die für die Reizweiterleitung verantwortlich sind. Weitere nicht reizleitenden Neuronengruppen der Netzhaut besitzen modulierende Funktionen, die für die Informationsverarbeitung essentiell sind. Das retinale Pigmentepithel dient der Ernährung der Fotorezeptoren. Informationen über den Verlauf der Sehbahnen finden sich im oberen Textabschnitt (Rüping und Fetzner 2011).

Es existieren zwei Arten von Fotorezeptoren, die Stäbchen und die Zapfen. Die Stäbchen bilden mit einer Anzahl von ca. 60-125 Millionen den Großteil der Rezeptoren. Während nur eine Art Stäbchen existiert, gibt es drei Arten von Zapfen, die jeweils auf das Licht einer bestimmten Wellenlänge (etwas vereinfacht gesagt rotes, grünes oder blaues Licht) besonders gut reagieren, so reagiert zum Beispiel ein rotempfindlicher Zapfen besonders gut bei einer Wellenlänge von etwa 567 nm (Speckmann et al. 2013). Die Anzahl der Rot- und Grünzapfen beträgt 3,2-6,5 Millionen und die der Blauzapfen 300.000-600.000 (Kellner 2008). Die Dichte der Rot- und Grünzapfen ist in der Fovea centralis, dem Ort des schärfsten Sehens (5% der Zapfen), am höchsten und nimmt nach peripher ab. Im Zentrum der Fovea besteht außerdem eine Tritanopie

(„Blaublindheit“), da dort keine Blauzapfen liegen. Die Stäbchen haben in ca. 20° Abstand von der Fovea ihre größte Dichte (Kellner 2008). Aufgrund der unterschiedlichen Rezeptorverteilung findet das photopische Sehen mit der Fovea statt. Unter skotopischen Bedingungen ist die Fovea hingegen nicht am Sehvorgang beteiligt, im Bereich der Fovea findet sich dann ein Skotom (Gesichtsfeldausfall).

### **2.2.3 Photopisches und Skotopisches Sehen**

Die Zapfen sind leuchtdichteunempfindlicher als die Stäbchen, weshalb sie hauptsächlich für das Sehen bei einer höheren - meist photopischen - Leuchtdichte verantwortlich sind. Beim Sehen mit den Zapfen können sowohl Leuchtdichteunterschiede als auch Farben erkannt werden, das Auflösungsvermögen ist aufgrund der hohen Zapfendichte in der Fovea hoch. Im Gegensatz dazu sind die Stäbchen leuchtdichteempfindlicher und sind daher für das Sehen bei einer niedrigeren – meist skotopischen – Leuchtdichte verantwortlich. Beim Sehen mit den Stäbchen können nur Leuchtdichteunterschiede erkannt werden („nachts sind alle Katzen grau“) und das Auflösungsvermögen ist aufgrund der geringeren Stäbchendichte geringer. Wechselt das Auge von einer photopischen in eine skotopische Umgebung muss es sich den neuen Leuchtdichtebedingungen anpassen, das heißt, es erfolgt der Übergang vom Zapfen- zum Stäbchensehen. Dieser Übergangsprozess wird als Dunkeladaptation bezeichnet.

## **2.3 Sehschärfebestimmung**

Die Sehschärfe ist ein wichtiges Maß im klinischen Alltag der Ophthalmologie, die zur Beurteilung des allgemeinen Funktionszustands des Auges herangezogen wird und relativ kosten- und zeitgünstig zu erheben ist (Levenson and Kozarsky 1990). Wie bereits in den *einleitenden Worten* beschrieben, gibt es mehrere Arten von Sehschärfen, die mit sich unterscheidenden Verarbeitungsmustern einhergehen. In den kommenden Abschnitten werden zwei Arten von Sehschärfen und deren standardisierten Messmethoden - soweit diese bekannt sind - zunächst kurz vorgestellt. Es handelt sich um die konventionelle Sehschärfe sowie die Übersehschärfe. Die Einheiten der Sehschärfe sind in dem gleichnamigem Abschnitt beschrieben.

### **2.3.1 Konventionelle Sehschärfe (VA)**

In diesem Absatz werden Grundlagen der konventionellen Sehschärfe, auch als Visus bezeichnet, beschrieben. Im klinischen Alltag wird hierfür häufig nur der Begriff „Sehschärfe“

verwendet. Ich spezifiziere diesen klinisch geläufigen Begriff zu konventioneller Sehschärfe um eine Unterscheidung zu der Übersehschärfe, die ebenfalls eine Sehschärfe ist, zu ermöglichen.

„Die VA misst das Auflösungsvermögen des Abstands zweier Punkte zueinander“ (Bondarko und Danilova 1997; Hecht 1928). Der Sehreiz wird mithilfe des optischen Apparats des Auges auf die Netzhaut projiziert, wo er die Rezeptoren aktiviert. Die Diskriminationsfähigkeit ist durch den Abstand der Rezeptoren (die Rezeptordichte), die optische Abbildungsqualität sowie die Leuchtdichte begrenzt (Applegate 2000; Shlaer 1937). Um zwei Punkte voneinander diskriminieren zu können muss sich zwischen den aktivierten Rezeptoren mindestens ein nicht-aktivierter Rezeptor befinden (siehe *Abbildung 4*).

Die VA-Bestimmung kann mithilfe unterschiedlicher Sehzeichen erfolgen, zum Beispiel E-Haken, Buchstaben, Symbolen (vornehmlich für Kinder) oder Landolt-Ringen. Eine standardisierte VA-Bestimmung, wie beispielweise bei Begutachtungen durchgeführt, findet unter folgenden Messbedingungen statt (Wesemann et al. 2010). Das Standardsehzeichen ist der Landolt-Ring mit acht Öffnungsrichtungen, der auf einem Prüffeld mit der Leuchtdichte von 160-320 cd/m<sup>2</sup> präsentiert wird. Bei drei aus fünf beziehungsweise sechs aus zehn richtigen Antworten gilt die jeweilige Sehstufe als bestanden. Die Messentfernung muss mindestens 4 m betragen, empfehlenswert ist eine Entfernung von 5-6 m (Augustin 2007). Ein wichtiger Einsatzbereich der standardisierten VA-Bestimmung ist die Blindenbegutachtung, die in den kommenden Jahren aufgrund der steigenden Lebenserwartung an Wichtigkeit gewinnen wird. In den Leitlinien der deutschen Ophthalmologischen Gesellschaft (2011) ist Blindheit wie folgt definiert: „Die VA beträgt auf keinem Auge und auch nicht beidäugig mehr als 0,02 oder es bestehen Störungen des Sehvermögens, die dieser Beeinträchtigung gleichkommen“. Diese Beeinträchtigungen sind zum Beispiel starke konzentrische Gesichtsfeldeinengungen (auf unter 5° des normalen Gesichtsfelds), Hemianopsien oder der vollständige Ausfall der Sehrinde (Augustin 2007; Knauer und Pfeiffer 2006).

Wie für die Übersehschärfe (siehe *Übersehschärfe*) ist auch für die photopische VA ein Lerneffekt beschrieben worden, der sich in einer Zunahme der VA im Verlauf mehrerer Messungen manifestiert. Eine Feedbackgabe begünstigt den Lerneffekt positiv, diese Wirkung zeigt sich insbesondere zwischen dem ersten und zweiten Messdurchgang. Mit Feedback zeigt sich eine Zunahme der photopischen VA um etwa 0,11 logMAR (siehe *Einheiten der*

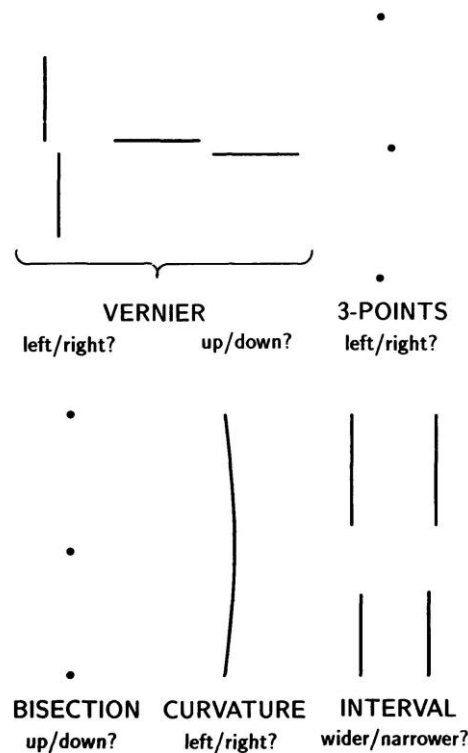
*Sehschärfen*), bei fehlendem Feedback zeigt sich eine Zunahme der photopischen VA um etwa 0,06 logMAR (Heinrich et al. 2011).

### **2.3.2 Übersehschärfe (HA)**

In diesem Absatz wird die Übersehschärfe (HA) vorgestellt. Die HA ist eine – im Vergleich zur VA - nicht so ausgiebig erforschte und nicht so häufig klinisch angewandte Sehschärfe. Der Begriff erklärt sich daraus, dass die „Über“-Sehschärfe ein höheres Auflösungsvermögen als die VA zeigt (Westheimer und Bass 2010; Westheimer 1987). Das Auflösungsvermögen kann im Bereich eines Fünftels eines Rezeptordurchmessers liegen (Westheimer und P. McKee 1977; Westheimer 1975). In den kommenden Abschnitten sollen Erkenntnisse über die HA vorgestellt werden.

#### *2.3.2.1 Sehreize zur Bestimmung der Übersehschärfe (HA)*

Zunächst werden Sehreize beschrieben, unter denen die HA beobachtbar ist. Dies ist der Fall, wenn die relative Position mindestens zweier Objekte zueinander bestimmt werden soll (Westheimer 1987). Der Standardsehreiz der HA ist die Balkenreizmethode, bei der der Versatz der Balken zueinander detektiert wird (Westheimer und McKee 1977; Westheimer und Bass 2010). Handelt es sich um den Versatz zweier parallel zueinanderstehender Balken, so wird im Deutschen auch der Begriff Noniussehschärfe, beziehungsweise im Englischen der Begriff „*vernier acuity*“ verwendet (Paul 2003). Die HA tritt jedoch auch bei anderen Sehreizen auf, wie zum Beispiel bei der Diskrimination zweier beziehungsweise dreier Punkte zueinander (Beck und Schwartz 1979; Wilson 1986). In Abbildung 3 sind Sehreize dargestellt, für die die HA beobachtbar ist. Ein Stereosehen ist ohne HA nicht möglich. Hierbei entsteht, durch die Analyse der relativen Position mehrerer Objekte zueinander, kortikal ein dreidimensionales Bild.



**Abbildung 3: Sehreize zur Bestimmung der HA.** In der Abbildung sind Sehreize gezeigt, die mithilfe der HA gelöst werden und Auflösungen im Bereich weniger Winkelsekunden zeigen. Weitere Informationen finden sich im oberen Textabschnitt (Poggio et al. 1991).

### 2.3.2.2 Besondere Eigenschaften der Übersehschärfe (HA)

Auch für die photopische HA ist ein Lerneffekt beschrieben worden (Fahle et al. 1995), das heißt, dass sich das Auflösungsvermögen der HA im Laufe mehrerer Messungen signifikant verbesserte. Allerdings schwankte diese Zunahme zwischen 20% und 70% (Fahle und Edelman 1993; Fendick und Westheimer 1983). Daneben fanden sich bezüglich der Lerneffekte folgende Besonderheiten.

- Der Lerneffekt zeigte sich *nur für den spezielle HA-Reiz*. Nach mehreren Messungen zeigte sich ausschließlich für den gemessenen HA-Reiz eine Zunahme des Auflösungsvermögens. Es zeigte sich jedoch keine generalisierte HA-Zunahme für andere HA-Reize (Crist et al. 1997; Fahle und Edelman 1993).
- Der Lerneffekt zeigte sich *nur für das aktivierte Netzhautareal*. Wurde der Sehreiz auf einem zuvor nicht-aktivierten Netzhautareal präsentiert, so zeigte sich auf diesem keine signifikante Zunahme der HA. Der Lerneffekt nahm mit zunehmender Entfernung von

dem zuvor aktivierten Netzhautareal ab (Crist et al. 1997; Westheimer 1982; Fahle et al. 1995).

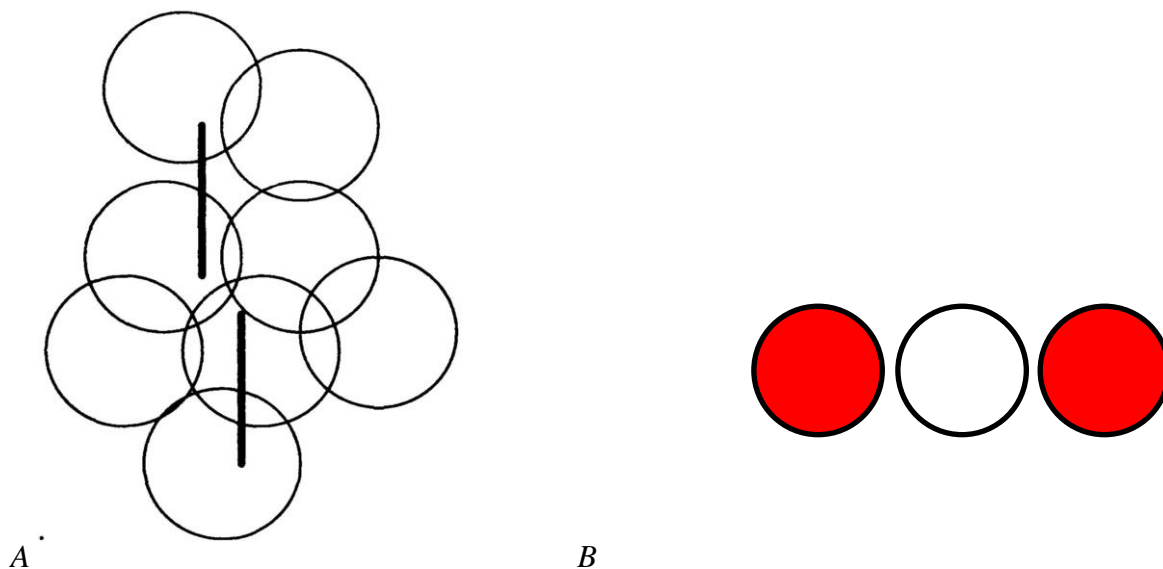
- c. Der Lerneffekt zeigte sich *nur für die spezielle HA-Reizorientierung*. Der Lerneffekt war spezifisch für eine HA-Sehreizorientierung. Probanden, bei denen sich eine Zunahme der HA gemessen mit der vertikalen Balkenreizmethode zeigte, zeigten keine signifikante Zunahme der HA für eine andere Sehreizorientierung, zum Beispiel bei Drehung des Balkenreizes um 90° (Crist et al. 1997).
- d. Es zeigte sich ein Lerneffekttransfer bei *Abstandsvergrößerung innerhalb des Sehreizes*. Blieben Orientierung sowie Sehreiz konstant und wurde lediglich der Abstand der Balken zueinander verdoppelt, so zeigte sich ein Lerneffekttransfer (Crist et al. 1997; Fahle und Edelman 1993; Fahle et al. 1995).
- e. Ein Lerneffekt war *auch bei fehlender Feedbackgabe* beobachtbar. Die meisten Sehtests beinhalten eine Feedbackfunktion, die dem Probanden eine Rückmeldung bezüglich seines Antwortverhaltens gibt. Ein Lerneffekt war jedoch auch bei fehlender Feedbackgabe beobachtbar, allerdings zeigte sich eine flachere Lernkurve (Fahle und Edelman 1993; Fahle et al. 1995; Herzog und Fahle 1997; Mckee und Westheimer 1978).
- f. *Der interokulare Lerneffekttransfer war gering*. Es zeigte sich bei Messung des einen Auges und dann bei anschließender Messung des anderen Auges, kein signifikanter interokularer Lerneffekttransfer (Fahle et al. 1995).
- g. Die HA *nahm in der Peripherie stärker ab, verglichen mit der VA*. Auch nach Verminderung von Lerneinflüssen nahm die HA stärker ab. (Westheimer 1982; Fendick und Westheimer 1983). Die HA nahm – im Vergleich zur VA - etwa doppelt so stark ab.

### 2.3.2.3 Verarbeitungsmechanismen der Übersehschärfe (HA)

In diesem Abschnitt werden die aktuellen Kenntnisse über die Verarbeitungsmechanismen der HA zusammengefasst. Der entsprechende HA-Sehreiz aktiviert mehrere Netzhautrezeptoren gleichzeitig (*Abbildung 4*). Befindet sich der Sehreiz zentral auf dem Rezeptor, zeigt der Rezeptor ein anderes Antwortverhalten, als wenn der Sehreiz den Rezeptor dezentral aktiviert.

Kortikal werden die verschiedenen Reizantworten dann zusammengefügt und verarbeitet (Fahle et al. 1995; Poggio et al. 1991; Westheimer und P. McKee 1977). Dieses HA-Erklärungsmodell wurde in Studien mithilfe von Computermodellen, wie zum Beispiel der sogenannten hyper-basis-Funktionen, simuliert (Poggio 1990). In den Studien zeigten diese Modelle ein Antwortverhalten, das dem menschlichen ähnelte (Poggio et al. 1992).

Der Einfluss der kortikalen Verarbeitung lässt sich mithilfe des kortikalen Vergrößerungsfaktors  $M$  quantifizieren. Der kortikale Vergrößerungsfaktor ( $M$  oder Magnifikationsfaktor) gibt „die Anzahl der Neurone, die an einer bestimmten beispielsweise visuellen Aufgabe beteiligt sind, an“ (Kreutzer et al. 2011) und kann mithilfe der funktionellen Magnetresonanztomographie bestimmt werden. In Studien zeigte sich, dass die HA direkt mit dem kortikalen Vergrößerungsfaktor des primären visuellen Kortex (V1) korrelierte (Schwarzkopf und Rees 2013; Levi, Klein and Aitsebaomo 1985). Nahm  $M$  in der Peripherie, im Vergleich zum Durchschnitt, stärker ab, so nahm analog dazu die HA ebenfalls stärker ab. Laut Duncan und Boynton (2003) ließen sich „bis zu 21%–23% der Variabilität der HA mit dem kortikalen Vergrößerungsfaktor erklären“.



**Abbildung 4: Erklärungsansatz der HA und VA.** A. HA-Erklärungsansatz: In der Abbildung ist ein Ausschnitt der Retina vereinfacht dargestellt. Die Kreise symbolisieren die Rezeptoren und die Balken die Sehzeichen. Wie bereits im Text beschrieben, reizen die HA-Sehzeichen, hier beispielhaft die Balkenreizmethode, mehrere Rezeptoren gleichzeitig. Aus der synchronen Erregung der Rezeptoren wird kortikal die Balkenrichtung „errechnet“ (Poggio et al. 1991). B. VA-Erklärungsansatz: Um zwei Punkte voneinander diskriminieren zu können, muss sich zwischen zwei „aktivierten Rezeptoren“ (ausgefüllte Kreise) mindestens ein „nicht-aktivierter“ Rezeptor (nicht-ausgefüllter Kreis) befinden.



## 2.4 Fragestellungen der Arbeit

Hauptziel der Arbeit war es eine Methode zu entwickeln zur verlässlichen beziehungsweise reproduzierbaren VA- und HA-Bestimmung unter photopischen und skotopischen Leuchtdichtebedingungen. Wie in der *Einleitung* beschrieben, sind bei der HA sowohl visuelle als auch kortikale Verarbeitungsprozesse involviert. Die HA stellt somit einen vielversprechenden wissenschaftlichen Ansatz dar, um grundlegende Einblicke der Funktionsweise des Sehsystems zu erhalten. Die Ergebnisse der Arbeit haben deshalb eine Relevanz für Studien auf dem Gebiet der Erforschung bestimmter ophthalmologischer Erkrankungen. Die untenstehenden Fragestellungen dienten als Leitfaden der Arbeit.

1. Welcher Messaufbau und welcher Sehreiz sind am geeignetsten zur Bestimmung der photopischen beziehungsweise skotopischen VA beziehungsweise HA?
2. Wie verhalten sich die VA beziehungsweise HA unter skotopischen Bedingungen?
3. Hat die Kontrastpolaritäten einen Einfluss auf die VA beziehungsweise HA?
4. Lassen sich Lerneffekte bei der VA- beziehungsweise HA-Bestimmung beobachten?
5. Wie verhalten sich die Sehschärfen zueinander?

Um die obenstehenden Fragestellungen zu behandeln, wurden die folgenden Arbeitsschritte durchlaufen.

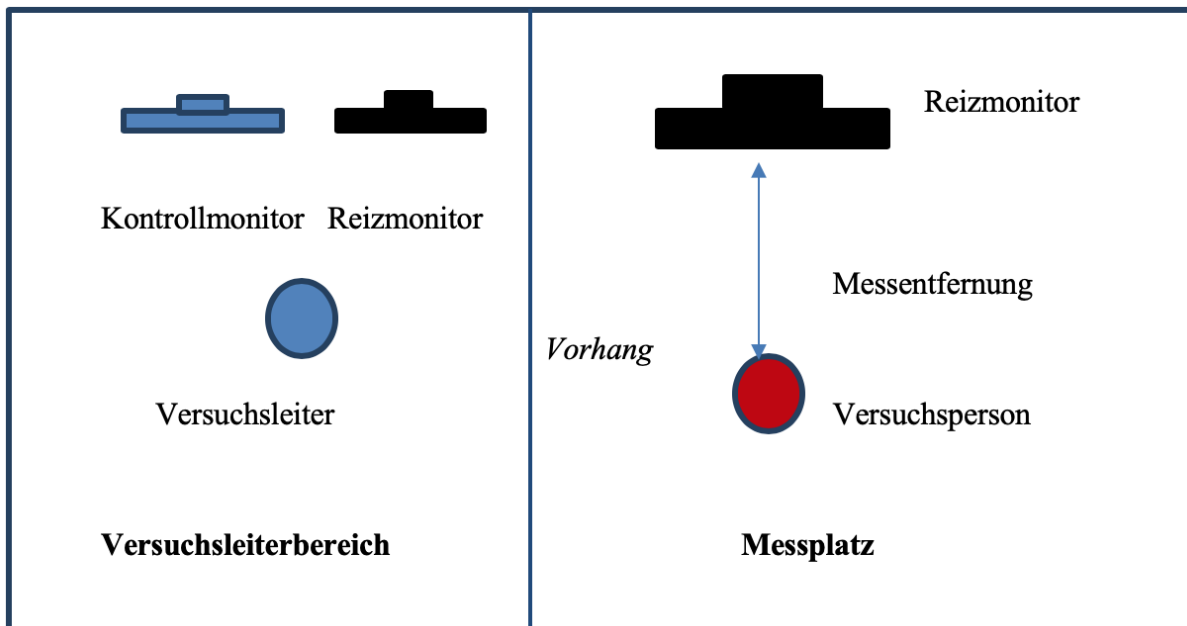
1. Entwicklung eines Messaufbaus und Messablaufs (Dunkeladaptationszeit, Anzahl der Messdurchgänge, Messentfernung) für photopische und skotopische Messungen (siehe *Vorexperimente 1-6*).
2. Entwicklung und Vergleich geeigneter Verfahren zur Messung der skotopischen HA (Vergleich verschiedener Balkenreizmethoden miteinander und Modifikation des Balkenreizes in Form von Kontrastpolarität und Leuchtdichte) (siehe *Vorexperimente 2-6*).
3. Bestimmung der photopischen und skotopischen VA beziehungsweise HA mit der optimierten Methode (siehe *Hauptexperiment*).

## 3 Material und Methoden

### 3.1 Allgemeine Grundlagen des Messaufbaus

In dem Abschnitt *Material und Methoden* sind die methodischen Grundlagen der Experimente beschrieben. Im Verlauf der insgesamt sieben Experimente wurden Einflussparameter der Sehschärfen modifiziert. In diesem Abschnitt werden die Einflussparameter beschrieben. Die genaue Modifikation des jeweiligen Parameters für jedes Experiments ist, wegen des besseren und einfacheren Verständnisses, im Abschnitt *Ergebnisse im lokalen Methodenteil* beschrieben.

Der Messaufbau bestand aus einem photopische und einem skotopischen Messplatz, die mit i-Mac-Rechnern und dem Apple-Betriebssystem MacOS 10 betrieben wurden. Insgesamt wurden drei Monitore verwendet, hierbei fungierte ein Monitor als Reizmonitor und die anderen beiden Monitore fungierten als Kontrollmonitore des Versuchsleiters (*Abbildung 5*). Als photopischer Reizmonitor diente ein LCD-Bildschirm, das Gesichtsfeld betrug  $5 \times 4$  Grad-Schwinkel ( $^{\circ}$ ) (38x30 cm). Im Laufe der skotopischen Versuche wurde der Reizmonitor geändert. Für die Vorexperimente 1-6 diente ein LCD- Bildschirm mit einem Gesichtsfeld von  $5 \times 4^{\circ}$  (38x30 cm) als Reizmonitor. Für das Hauptexperiment wurde ein CRT-Monitor mit einem Gesichtsfeld von  $11 \times 10^{\circ}$  (14x13,5 cm) als Reizmonitor verwendet. Die Auflösung der drei verwendeten Monitore betrug 1280x1024 Pixel, ihre Refresh-Rate betrug 60 Hertz. Die skotopischen Reizmonitore wurden mithilfe von Filtern, die im Abschnitt *Leuchtdichtebedingungen* beschrieben werden, verdunkelt. Im Abschnitt *Beispielhafter Ablauf einer Messung* ist der Messablauf erläutert. Die Sehschärfen des Vorexperiments 6 sowie des Hauptexperiments wurden von einer technischen Assistentin (Frau Wolff und Frau Kramer) erhoben.



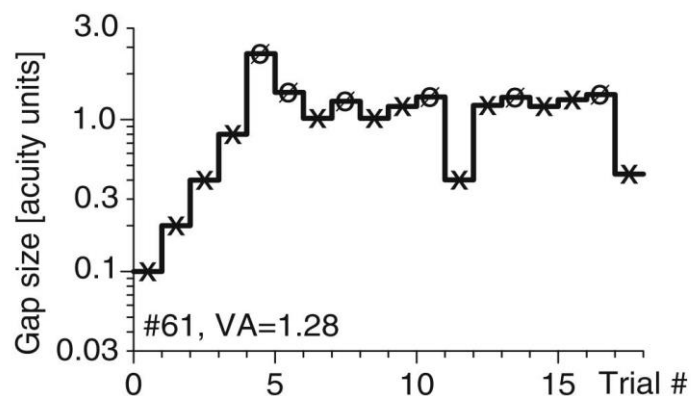
**Abbildung 5: Skizzenhafter Aufbau des Messplatzes.** Der Versuchsleiterbereich und der Messplatz sind durch einen lichtundurchlässigen Vorhang voneinander getrennt. Der Versuchsleiter konnte mithilfe des Kontrollmonitors die Sehtests auf dem Reizmonitor starten. Die Versuchsperson nannte die Antwort, diese wurde vom Versuchsleiter eingegeben.

### 3.1.1 Versuchspersonen

Insgesamt 23 Personen nahmen freiwillig an den Messungen teil und wurden vor den Messungen mündlich und schriftlich über Messablauf, die Messrisiken und über ihr Recht zum unbegründeten Abbruch der Messungen aufgeklärt. Die Versuchspersonen gaben ihr schriftliches Einverständnis. Die Versuchsabläufe entsprachen den Grundsätzen der Helsinki-Deklaration (World Medical Association Declaration of Helsinki. 2013) und enthielten die Genehmigung der Ethikkommission der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg. Die Altersspanne der Probanden lag zwischen 21 und 34 Jahren, das mittlere Alter betrug 24 Jahre. Einschlusskriterium war ein normaler Visus ( $\geq 1$  decVA). Falls notwendig, wurde eine Refraktionskorrektur getragen. Die Messungen wurden monokular für das Auge mit dem höheren VA-Auflösungsvermögen durchgeführt. Das bessere Auge wurde zu Beginn der Messung wie folgt bestimmt: Für jedes Auge wurde zweimal die photopische VA bestimmt und anschließend gemittelt.

### 3.1.2 Sehschärfemessungen mit dem Freiburg Visual Acuity & Contrast Test

Für die Sehschärfemessungen wurde der Freiburg Visual Acuity & Contrast Test (FrACT) verwendet, ein Computerprogramm zur automatisierten Sehschärfebestimmung. Anhand des Antwortverhaltens wird die maximale Sehschärfe der Versuchsperson ermittelt. Die Sehreizgröße passt sich dem Antwortverhalten an. Bei einer richtigen Antwort verkleinert sich der Sehreiz, bei einer Falschantwort vergrößert sich der Sehreiz (siehe *Abbildung 6*). Es handelt sich um ein adaptives Verfahren zur Bestimmung der Sehschärfe, das „im FrACT mit dem sogenannten Best-PEST-Algorithmus (Best Parameter Estimation by Sequential Testing) umgesetzt wird“ (Bach 2007). Der Wert der maximalen Sehschärfe wurde in Übereinstimmung mit der DIN-Norm für 60% der korrekten Antworten festlegt (Sehschwelle). Da Messungen im Schwellenbereich unangenehm sind, wurde bei jedem sechsten Durchgang ein vierfach größerer Sehreiz präsentiert. Dieser Durchgang diente der Motivation der Probanden (Bach 1996). Bei der Sehschärfebestimmung mithilfe des FrACT handelt es sich um ein sogenanntes „alternativ-forced-choiced“ (AFC-) Verfahren: „Alternativ“ bedeutet, dass mehrere Antwortmöglichkeiten existieren und „forced-choiced“ bedeutet, dass der Proband auch bei Unsicherheit eine Antwort geben muss.



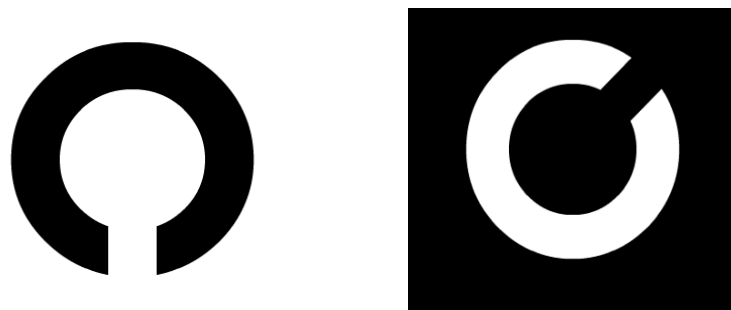
**Abbildung 6: Bestimmung der maximalen Sehschärfe mithilfe des Best-PEST-Algorithmus.** Die Abbildung zeigt beispielhaft das Ermitteln der maximalen Sehschärfe mithilfe des Best-Pest-Algorithmus (Best Parameter Estimation by Sequential Testing). Eine richtige Antwort wird durch ein Kreuz symbolisiert, eine falsche Antwort wird durch einen durchgekreuzten Kreis symbolisiert. Die ersten vier Sehreize sind standardisiert, danach passt sich der Sehreiz dem Antwortverhalten an. Jeder sechste Durchgang war ein Motivationsdurchgang mit einem vierfach größeren Sehzeichen (Bach 2007).

Die Darstellung des Sehreizes ist durch die Pixelgröße des Monitors begrenzt. Der FrACT verwendet die Methode des „Anti-Aliasing“. Das Anti-Aliasing ermöglicht die Darstellung kleiner – normalerweise auf dem Monitor nicht mehr scharf darstellbarer - Sehreize und verhindert damit das Auftreten von Darstellungsgrenzeffekten bei üblichen Messentfernungen (Bach 1996). Bei dem Verfahren werden die Pixel in Randbereich des Sehreizes in absteigenden Graustufen dargestellt. Hierdurch wird eine Glättung, aber auch eine Unschärfe der Ränder erzeugt, diese hat jedoch keinen negativen Einfluss auf die bestimmte Sehschärfe (Bach 1996; Wesemann 2002).

Die Sehschärfebestimmung wurden für die VA und HA mit auf den folgenden Seiten beschriebenen Messmethoden sowie für folgende unten aufgeführte Einflussfaktoren (unterschiedliche Kontrastpolaritäten und Leuchtdichten) durchgeführt.

### 3.1.3 Messmethodik der konventionelle Sehschärfe (VA)

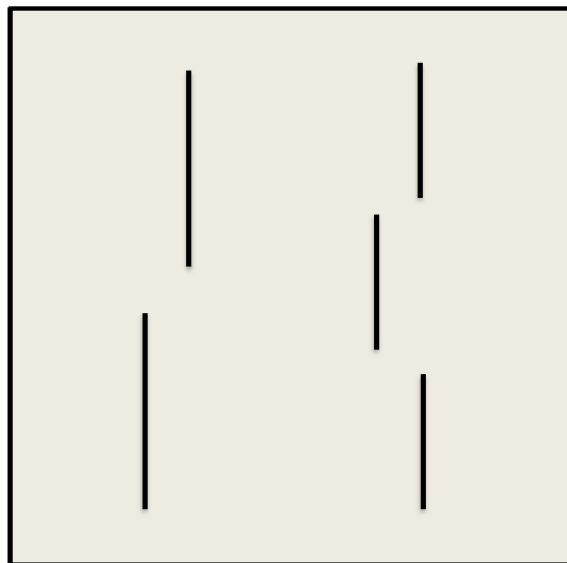
Physiologische Grundlagen der VA sind im Abschnitt *Einführung* behandelt. In diesem Absatz ist die Messmethodik der VA-Bestimmung erläutert. Für die VA-Bestimmung wurde der Landolt-Ring (ein Kreis mit einer Öffnung definierter Größe) verwendet. Die Größe der Öffnung beträgt ein Fünftel des Kreisdurchmessers (Bach 2007; Graf 2004). Es gab acht Öffnungsrichtungen, deshalb handelt es sich um ein 8-Alternative-forced-choice-Verfahren (AFC-Verfahren). Die Aufgabe besteht in der Benennung der Öffnungsrichtung (*Abbildung 7*). Die Probanden gaben die Öffnungsrichtung in Uhrzeiten an, so entsprach beispielsweise drei Uhr der Öffnung im rechten Viertel des Kreises. Da mit steigender Anzahl der Antwortmöglichkeiten die Ratewahrscheinlichkeit sinkt, sind 18 Sehreize je Messung ausreichend (Bach 1996).



**Abbildung 7: Schema eines Landolt-Rings.** Der Landolt-Ring ist für die positive- (schwarzer Reiz) und negative (weißer Reiz) Kontrastpolarität dargestellt. Die Öffnungsgröße beträgt ein Fünftel des Kreisdurchmessers. Weiter Information über den Landolt-Ring finden sich im oberen Textabschnitt.

### 3.1.4 Messmethodik der Übersehschärfe (HA)

Physiologische Grundlagen der HA sind im Abschnitt *Einführung* behandelt. In diesem Absatz ist die Messmethodik der HA-Bestimmung erläutert. Für HA-Bestimmung wurde die Balkenreizmethode (mindestens zwei voneinander versetzte Balken) verwendet. Aus dem Abstand der Balken zueinander wird die HA errechnet. Bei einer korrekten Antwort verkleinert sich der Abstand, bei einer falschen Antwort vergrößert sich der Abstand. Der Proband musste die Richtung des Versatzes der Balken zueinander angeben. Es handelt sich um ein 2-AFC-Verfahren („rechts“ oder „links“). Bei einer Ratewahrscheinlichkeit von 50% wurden 42 Sehreize je Messdurchgang präsentiert, zur Reduktion des Zufallseffekts. Es wurden zwei unterschiedliche Balkenreizmethoden verwendet: Die Zwei-Balkenreizmethode (Poggio et al. 1991), bestehend aus zwei Balken (siehe *Vorexperimente 2 und 3*) sowie die Drei-Balkenreizmethode (Livingstone und Hubel 1994), bestehend aus drei Balken (siehe *Vorexperimente 4-6 und das Hauptexperiment*) (Abbildung 6).



**Abbildung 6: Zwei- und Drei-Balkenreiz.** Die Balkenreize sind für die positive (schwarzer Reiz) Kontrastpolarität dargestellt. Bei dem Zwei-Balkenreiz muss die Versuchsperson den Versatz des oberen zum unteren Balken angeben, in diesem Beispiel rechts. Bei dem Drei-Balkenreiz muss der Versatz des mittleren Balkens zu den beiden fixierten rahmenden Balken angegeben werden, in diesem Beispiel links.

Die Maße der Sehzeichen lassen sich über die FrACT-Einstellung „Venier-Scale“ verändern, je höher die Venier-Scale, desto größer sind die Sehzeichenmaße (Bach 2016). Für die Bestimmung der photopischen Sehschärfe wurde eine Venier-Scale von 1 und für die Bestimmung der skotopischen Sehschärfe eine höhere Venier-Scale von 18 gewählt. Der Faktor 18 errechnet sich aus dem Verhältnis der photopischen und skotopischen VA des ersten

Vorexperimente (Photopische VA/ Skotopischen VA=18). Für die skotopischen Messungen wurden größere Sehzeichen verwendet, um das Erkennen zu erleichtern. Das Maß beziehungsweise die Venier Scale des Sehzeichens fließt in die Berechnung der Sehschärfe ein, somit ist eine Vergleichbarkeit der photopischen und skotopischen Sehschärfen trotz unterschiedlicher Sehzeichenmaße möglich.

### 3.1.5 Leuchtdichtebedingungen

Die Monitorleuchtdichte wurde in der Bildschirmmitte (im Zentrum des Sehreizes) mit folgendem Photometer bestimmt: Chroma Meter CS-100A, Konica Minolta. Die maximale beziehungsweise die minimale photopische Leuchtdichte betrug  $218 \text{ cd/m}^2$  beziehungsweise  $0,75 \text{ cd/m}^2$ . Die photopische Leuchtdichte wurde von der gedimmten Deckenleuchte und der Monitorleuchtdichte erzeugt. Die Messentfernung betrug 4 m.

Bei einer skotopischen Leuchtdichte ist keine Zapfenaktivität – also eine Zentralskotom entweder im MRT oder dem mfERG – nachweisbar. Der Monitorhelligkeit wurde mithilfe von Filtern (Neutral Density Filter von Lichttechnik Hahne in Düsseldorf) auf das gewünschte Leuchtdichteniveau reduziert. Beispielsweise bedeutet die Filterangabe 6%, dass 6% des eingestrahnten Lichts transmittiert wird. Es wurde unter den folgenden unten aufgeführten skotopischen Leuchtdichtebedingungen gemessen.

- (a)  $0,0003 \text{ cd/m}^2$ : Die Vorexperimente 2-5 wurden unter einer maximalen beziehungsweise minimalen skotopischen Leuchtdichte von  $0,0003 \text{ cd/m}^2$  beziehungsweise  $0,000003 \text{ cd/m}^2$  durchgeführt. Feigl et al. (2006) beschreiben bei einer Leuchtdichte von  $0,00025 \text{ cd/m}^2$  ein Zentralskotom im multifokalen Elektroretinogramm (mfERG). Muranyi bestimmte bei einer maximalen Leuchtdichte von  $0,0003 \text{ cd/m}^2$  ebenfalls eine Zentralskotom im mfERG (Muranyi and Hoffmann 2016). Filterfolien mit folgenden Transmissionswerten wurden verwendet: 4x6% (1.2ND Neutral Density Filter, Nr. 299) und 1x 23% (.6ND Neutral Density Filter, Nr. 210). Die maximale Monitorleuchtdichte betrug  $100 \text{ cd/m}^2$ , die Messentfernung betrug je nach Vorexperiment 0,25 m, 0,5 m oder 1 m.
- (b)  $0,003 \text{ cd/m}^2$ : Das Vorexperiment 6 wurde unter einer maximalen beziehungsweise minimalen skotopischen Leuchtdichte von  $0,003 \text{ cd/m}^2$  beziehungsweise  $0,00003 \text{ cd/m}^2$  durchgeführt. Barton und Brewer (2017) beschreiben unter dieser Leuchtdichte im multifokalen Magnetresonanztomographen ein Zentralskotom. Filterfolien mit

folgenden Transmissionswerten wurden verwendet: 3x6% (1.2ND Neutral Density Filter, Nr. 299) und 1x13,7% (.9ND Neutral Density Filter, Nr. 211). Die maximale Monitorleuchtdichte betrug  $100 \text{ cd/m}^2$ , die Messentfernung betrug 1 m.

(c)  $0,004 \text{ cd/m}^2$ : Das Hauptexperiment wurde unter einer maximalen beziehungsweise minimalen skotopischen Leuchtdichte von  $0,004 \text{ cd/m}^2$  beziehungsweise  $0,00005 \text{ cd/m}^2$  durchgeführt. Die Erkenntnisse von Barton und Brewer (2017) dienen als Grundlage der verwendeten maximalen Leuchtdichte. Es wurde folgender Filter verwendet: Haida 150mm x 150mm, Neutral Density (ND) 32000, ND-4.5, 15 Stop Neutral Density ND Optical Glass 150 Series, mit den Maßen 14x13,5 cm. Der Transmissionsfaktor betrug 32.000. Die maximale Monitorleuchtdichte betrug  $130 \text{ cd/m}^2$ , hieraus errechnet sich eine maximale Leuchtdichte von  $0,004 \text{ cd/m}^2$  bei oben genannter Monitorhelligkeit ( $130 \text{ cd/m}^2/32000=0,004 \text{ cd/m}^2$ ). Aufgrund der Filtermaße von 14x13,5 cm und des kleineren Sichtfensters, wurde die Messentfernung auf 0,75 m reduziert.

### **3.1.6 Kontrastpolarität**

In den Vorexperimenten 5 und 6 und dem Hauptexperiment wurden VA und HA für zwei unterschiedliche Kontrastpolaritäten bestimmt: Schwarzer Sehreiz auf weißem Hintergrund (positive Kontrastpolarität) und weißer Sehreiz auf schwarzem Hintergrund (negative Kontrastpolarität). Die HA-Sehreizmaße ändern sich im FrACT bei Umstellung der Kontrastpolarität. Um eine Vergleichbarkeit der Sehschärfen beider Kontrastpolaritäten miteinander zu gewährleisten, müssen beide Sehreize dieselben Maße haben. Das Balkenmaß kann über den Leuchtdichtekalibrierungsfaktor ( $\gamma$ ) eingestellt werden (Bach 2016):  $\gamma$  betrug für die negative Kontrastpolarität 0,5 und für die positive Kontrastpolarität 1,8. Der unterschiedliche Leuchtdichtekalibrierungsfaktor wird bei der Berechnung der Sehschärfe berücksichtigt, sodass ein Vergleich der Sehschärfen der beiden Kontrastpolaritäten möglich ist. Die Balkenmaße unter den photopischen Leuchtdichtebedingungen betragen  $0,2 \times 0,02^\circ$  ( $16,5 \times 1 \text{ mm}$ ). Die Balkenmaße unter den skotopischen Leuchtdichtebedingungen betragen für 1 m Messentfernung  $4 \times 0,2^\circ$  ( $76,5 \times 2 \text{ mm}$ ), für 0,75 m Messentfernung  $4 \times 0,2^\circ$  ( $56,0 \times 1,7 \text{ mm}$ ) und für 0,5 m Messentfernung  $4 \times 0,2^\circ$  ( $38,0 \times 1,5 \text{ mm}$ ).



### **3.2 Beispielhafter Ablauf einer Messung**

Die Versuchsperson wurde vor dem Reizmonitor platziert, eine Kinnstütze gewährleistete eine gleichbleibende Messentfernung. Die Sehschärfebestimmung erfolgte monokular. Der Versuchsleiter, durch einen Vorhang vom Probanden getrennt, startete den Sehtest auf dem Kontrollmonitor und spielte diesen dann auf dem Reizmonitor. Die Reihenfolge der Sehtests wurden nach dem A-B-B-A-, beziehungsweise B-A-A-B- Schema (zum Beispiel VA, HA, HA, VA) variiert, um sequentielle Messeffekte zu verhindern. Die Versuchsperson musste innerhalb von 30 Sekunden eine Antwort geben, die von dem Versuchsleiter eingegeben wurde. Die Antworteingabe erfolgte durch den Versuchsleiter, da insbesondere unter skotopischen Leuchtdichtebedingungen gehäuft fehlerhafte Eingaben der Probanden auftraten. Nach Antworteingabe generiert der FrACT einen Ton, der dem Probanden eine akustische Rückmeldung (richtige- oder falsche Antwort) gibt. In Tabelle 1 sind die Fragestellung und Messeinstellung des jeweiligen Experiments zusammengefasst.

				Photopische Bedingungen:			Skotopische Bedingungen:		
Messreihe +Fragestellung	Probanden (n)	BA (#)	KP	Lum./Dist.	VA (#)	HA (#)	Lum./ Dist.	VA (#)	HA (#)
<b>Vorexperiment 1</b> <i>Dunkeladaptationsbestimmung</i>	10	-	100	-	-	-	0,0003/ 0,5	10	-
<b>Vorexperiment 2</b> <i>Erste Versuchsmessungen</i>	10	2	100	218/ 4	2	2	0,0003/ 0,5	2	2
				218/ 4			0,0003/ 0,25	1	1
<b>Vorexperiment 3</b> <i>Skotopische Messung für zwei Entfernungen</i>	8	2	100	218/ 4	<b>1</b>	<b>1</b>	0,0003/ 0,5	1	1
				218/ 4			<b>0,0003/ 1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>
<b>Vorexperiment 4</b> <i>Messung mit dem Drei-Balkenreiz</i>	8	<b>3</b>	100	218/ 4	2	2	0,0003/ 0,5	1	1
				218/ 4			0,0003/ 1	1	1
<b>Vorexperiment 5<sup>+</sup></b> <i>Messung mit dem Drei-Balkenreiz für zwei Kontrastpolaritäten</i>	16	3	100	218/ 4	1	1	0,0003/ 1	1	1
			<b>-100</b>	<b>218/ 4</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>0,0003/ 1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>
<b>Vorexperiment 6</b> <i>Erneute Messung des Vorexperiments 5 unter zehnfach höherer Leuchtdichte</i>	10	3	100	218/ 4	1	1	<b>0,003/ 1</b>	1	1
			-100	218/ 4	1	1	<b>0,003/ 1</b>	1	1
<b>Hauptexperiment<sup>+</sup></b> <i>Messung bei einer Leuchtdichte von 0,004 cd/m<sup>2</sup> und bei erhöhter Abbildungsqualität</i>	10	3	100	218/ 4	1	1	<b>0,004/ 0,75</b>	1	1
			-100	218/ 4	1	1	<b>0,004/ 0,75</b>	1	1

**Tabelle 1: Tabellarische Zusammenfassung der einzelnen Experimente.** In der Tabelle sind die zentralen Einstellungen des jeweiligen Experiments zusammengefasst. Im Abschnitt *Ergebnisse* sind die Messeinstellungen ausführlicher beschrieben. Modifikationen zum vorherigen Experiment sind fett gedruckt. Folgenden Abkürzungen und Einheiten werden verwendet. **BA** (Balkenanzahl/ #): Zwei (2)- oder Drei (3)-Balkenreizmethode. **KP** (Kontrastpolarität): Positive (100) oder Negative (-100) KP. **Lum** (maximale Leuchtdichte/ Luminance): [cd/m<sup>2</sup>]. **Dist** (Messentfernung/ Distance): [m]. **VA** (Konventionelle Sehschärfe/ Visual Acuity): Anzahl (#) der VA Messungen. **HA** (Überschärfe/ Hyperacuity): Anzahl (#) der HA Messungen. <sup>+</sup>: Zweimalige Messung an unterschiedlichen Tagen.

### 3.3 Sehschärfeauswertung

Die Sehschärfen wurden während der Messung automatisch gespeichert und nach der Messung mit dem „Einfügen-Befehl“ in ein Word-Dokument übertragen. In Abbildung 7 sind die Informationen gezeigt, die für jede Messung erhoben wurden.

Row 1								
date [yyyy-mm-dd]	time [hh:mm:ss]	<final result>	result unit	test name	<distance>	dist. unit	<n>	"nTrials"
Subsequent rows								
Trial #	value presented (decimal)	orientation angle presented [°]	orientation angle responded [°]	correctness (1=yes, 0=no)	reaction time [ms]			

**Abbildung 7: Gespeicherte Informationen mithilfe des FrACT (Bach 2016).** In der Abbildung sind die Dateninformationen gezeigt, die für jeden Durchgang gespeichert wurden. „Row 1“ gibt die allgemeinen Informationen wieder (Datum, Uhrzeit, Testergebnis, Messeinheit, Sehtest, Messentfernung, Anzahl der Durchgänge). In der „Subsequent row“ ist die Information über jede einzelne Messung angegeben (Sehzeichenauflösung, Sehzeichenrichtung präsentiert, Sehzeichenrichtung geantwortet, richtige oder falsche Antwort, Zeit bis zur Antwort).

Alle Sehschärfen wurden in die Einheit logMAR (siehe *Einheiten der Sehmaße*) umgerechnet, die Auswertung der Sehschärfen erfolgte in der Einheit logMAR. Die graphische Auswertung erfolgte mit dem Programm Igor Pro (Version 6.37), die statistische Auswertung mit dem Statistikprogramm SPSS (Version 24).

### 3.4 Einheiten der Sehschärfen

In diesem Absatz sind die Einheiten der Sehschärfen sowie deren Umrechnung ineinander beschrieben. Die VA wird zum Beispiel im klinischen Alltag standardmäßig in der Einheit Dezimalvisus [decVA] angegeben. Der decVA errechnet sich aus dem reziproken Wert des Auflösungsvermögens in Winkelminuten [decVA= 1/ Auflösung in Winkelminuten] (Augustin 2007; Chen et al. 2012; Graf 2004).

Die HA wird standardmäßig in der Einheit Winkelsekunden [arcsec: englisch für arc-second] angegeben. Der Umrechnungsfaktor von Winkelminute und Winkelsekunde ist 60. Das Auswerten der oben genannten Einheiten ist umständlich, da die Einheiten logarithmisch skaliert werden müssen (Bach et al. 1998). Für Rechenschritte müssen die Einheiten Winkelminute, Winkelsekunde und Grad-Sehwinkel zunächst dekadisch logarithmiert und, um die ursprüngliche Einheit zu erhalten, anschließend wieder potenziert werden.

Die Auswertung und graphische Darstellung wird durch die Sehschärfeeinheit logMAR (dekadisch logarithmierter „Minimum Angle of Resolution“) vereinfacht. Da diese Einheit bereits dekadisch logarithmiert sind, entfallen Umrechnungsschritte und eine lineare Skalierung ist möglich. LogMAR errechnet sich aus dem negativen dekadischen Logarithmus des Dezimalvisus, oder anders formuliert, aus dem dekadischen Logarithmus des Kehrwertes des Dezimalvisus (Bach 2016):

$$\log\text{MAR} = -\log(\text{decVA}) = \log(1/\text{decVA})$$

Es gilt zu beachten, dass der logMAR mit zunehmender Sehschärfe abnimmt und mit abnehmender Sehschärfe zunimmt. In Abbildung 8 sind zur Verdeutlichung die Sehschärfeeinheiten angegeben. Auf die beiden Einheiten Snellen und MAR wird nicht eingegangen, da sie nicht in der Arbeit verwendet werden.

<i>Sehschärfe</i>	<i>Snellen</i>	<i>MAR</i>	<i>logMAR</i>
2,0	6/3	0,5'	-0,3
1,6	6/3,75	0,63'	-0,2
1,25	6/4,8	0,8'	-0,1
1,0	6/6	1,0'	0
0,8	6/7,5	1,3'	0,1
0,63	6/10	1,6'	0,2
0,5	6/12	2,0'	0,3
0,4	6/15	2,5'	0,4
0,32	6/20	3,2'	0,5
0,25	6/24	4,0'	0,6
0,2	6/30	5,0'	0,7
0,16	6/38	6,3'	0,8
0,12	6/48	7,9'	0,9
0,1	6/60	10,0'	1,0
0,08	6/75	12,6'	1,1
0,06	6/100	15,8'	1,2
0,05	6/120	20,0'	1,3

**Abbildung 8: Einheiten der Sehschärfe.** Weitere Informationen finden sich im oberen Textabschnitt (Graf 2004).

## **3.5 Statistik**

### **3.5.1 Allgemeine Statistik**

Die statistischen Parameter (Mittelwert, Standardmessfehler (SEM), Signifikanzniveau (P-Wert) und Korrelationskoeffizient (r)) wurden mit dem Statistikprogramm SPSS (IBM-Version 24) ermittelt (Trampisch et al. 2000).

Die in der Arbeit erhobenen Daten waren näherungsweise normalverteilt. Die Bestimmung der Normalverteilung erfolgte mithilfe des Shapiro-Wilk-Tests für ein Signifikanzniveau von  $P=0,05$  (Shapiro and Wilk 1965).

Mithilfe der repeated-measure Varianzanalyse (ANOVA; „analysis of variance“) wird die Abhängigkeit zweier oder mehrerer unabhängiger Variablen (Einflussfaktoren) (1. Sehtest; 2. Leuchtdichtebedingung; 3. Kontrastpolarität; 4. Messentfernung und 5. Messdurchgang) auf eine metrische Zielvariabel (in diesem Fall die Sehschärfe) analysiert (Janczyk and Pfister 2015; Timischl 2013). In den Vorexperimenten begrenzte sich die statistische Analyse auf die konkrete Fragestellung. Sollte beispielsweise der Einfluss der Kontrastpolarität auf die Sehschärfe untersucht werden und zeigte sich in der mehr-Faktor-ANOVA auch die Leuchtdichtebedingung als signifikanter Einflussfaktor, wurden keine Post-hoc-Teste zur weiteren Analyse der Leuchtdichtebedingung durchgeführt, weil sich hieraus keine Erkenntnisse für die ursprüngliche Fragestellung ableiten ließen.

Für die Post-hoc-Tests wurden nicht-signifikante Einflussfaktoren ausgeschlossen. Von den signifikanten Faktoren wurden dann alle Kombinationen der Faktorstufen betrachtet. Als Post-hoc-Test wurde der t-Test verwendet. Bei dem t-Test handelt es sich um einen sogenannten parametrischen Test, das heißt, der Test setzt voraus, dass die Daten näherungsweise normalverteilt sind. Der t-Test wurde entweder für gepaarte (Daten wurden an derselben Person ermittelt) oder für ungepaarte (Daten wurden an unterschiedlichen Personen ermittelt) Datensätze ermittelt (Gaus und Muche 2014; Harms 2012; Trampisch et al. 2000). Ein  $P\text{-Wert} < 0,05$  zeigt einen schwach signifikanten Unterschied und ein  $P\text{-Wert} < 0,001$  zeigt einen hochsignifikanten Unterschied.

Multiplizieren an einer Stichprobe erhöht die Wahrscheinlichkeit die Nullhypothese fälschlicherweise abzulehnen (Fehler erster Art). Deshalb wurden die P-Werte – falls

signifikant – mithilfe der Bonferoni-Holm-Methode korrigiert (Holm 1979). Der korrigierte P-Wert wurde folgendermaßen angegeben:  $P_{\text{korrigiertes Signifikanzniveau}}$ .

### **3.5.2 Limits of Agreement (LOA)**

Für die Analyse der Reproduzierbarkeit einer Messmethode wurde das „Limits of Agreement“ (LOA) verwendet. Für den Vergleich zweier Datensätze miteinander ist die Verwendung des Korrelationskoeffizienten ( $r$ ) ungeeignet (Bland und Altman 1986). Das LOA ermittelt sich wie folgt: Zunächst wird für jede Versuchsperson die Differenz der beiden Messwerte gebildet. Aus den Differenzdaten wird anschließend die Standardabweichung ( $s$ ) ermittelt. Das LOA ist definiert als die 1,96fache Standardabweichung der Differenzen oberhalb und unterhalb des Mittelwertes der Differenzen. In diesem LOA-Intervall liegen 95% der gemeinsamen Messwerte (Bland und Altman 1999). Je größer dieses Intervall ist, desto geringer ist die Reproduzierbarkeit der Messmethode zu betrachten.

## 4 Ergebnisse

Der Abschnitt *Ergebnisse* ist in sieben Teile gegliedert. In jedem Teil wird ein Experiment behandelt. Jeder Teil umfasst eine kurze Einleitung, die Beschreibung der, für jedes Experiment veränderten, Messeinstellungen (*lokale Methodik*), die Ergebnisse sowie eine *lokale Diskussion* der Ergebnisse. Da die einzelnen Experimente aufeinander aufbauen, wurde die oben beschriebene Gliederung verwendet, um ein besseres Verständnis zu ermöglichen. Im Abschnitt *Diskussion* werden dann zentrale Erkenntnisse der Arbeit diskutiert.

Folgende Zielsetzungen dienten als Leitfaden des vorliegenden Abschnittes.

1. *Messmethode (Vorexperimente)*. Ein Ziel der Arbeit war die Entwicklung einer geeigneten Messmethodik, insbesondere für die Bestimmung der skotopischen HA. Deshalb wurden zunächst mehrere aufeinander aufbauende Experimente - als Vorexperimente bezeichnet – durchgeführt, in denen mögliche Einflussfaktoren der Sehschärfe modifiziert wurden. Durch Vergleich der Vorexperimente miteinander wurde eine optimierte Messmethode zur Bestimmung der Sehschärfe entwickelt.
2. *Referenzdatenerhebung (Hauptexperiment)*. Ziel des Hauptexperiments war es Referenzdaten der VA und HA mit der optimierten Messmethode zu erheben. Aus den Daten des Hauptexperiments wurden grundlegenden Erkenntnisse über VA und HA abgeleitet.

### 4.1 Vorexperiment 1: Bestimmung einer geeigneten Dunkeladaptationszeit

#### 4.1.1 Einleitung

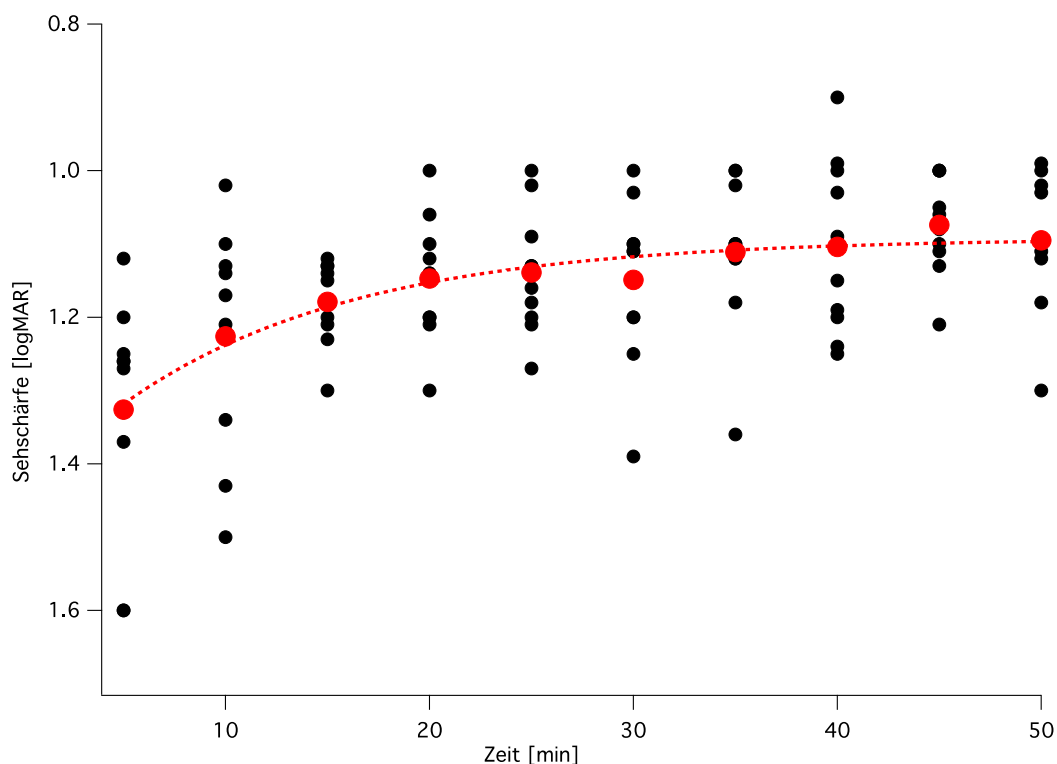
Ein Teil der Experimente fand unter skotopischen Leuchtdichtebedingungen statt. In der Literatur fanden sich uneinheitliche Angaben bezüglich der sogenannten Dunkeladaptationszeit (die Zeit bis das Stäbchensystem ausreichend sensibilisiert ist). Aufgrund der uneinheitlichen Literaturangaben wurde Vorexperiment 1 durchgeführt mit dem Ziel eine geeignete Dunkeladaptationszeit für den Messaufbau zu bestimmen. Hierzu wurde die skotopische VA in regelmäßigen Abständen bestimmt. Im Zeitverlauf kam es aufgrund der Sensibilisierung der Rezeptoren zu einer Zunahme der VA. Als eine geeignete Dunkeladaptationszeit galt der Zeitpunkt, zu dem sich die VA zum vorherigen Wert nur noch gering veränderte.

### 4.1.2 Lokale Methodik

Die skotopische Leuchtdichte betrug zunächst  $0,0003 \text{ cd/m}^2$ , da bei dieser Leuchtdichte ein Zentralskotom im multifokalen Elektoretinogramm beschrieben wurde (Feigl et al. 2006). Die Gesamtmessdauer betrug etwa 55 Minuten. Für zehn unerfahrene Probanden wurde, in fünfminütigen Abständen und monokular, die VA (Bach 1996) zehnmal bestimmt. Die Messentfernung betrug 0,5 m.

### 4.1.3 Ergebnisse

In diesem Absatz ist der Verlauf der skotopischen VA während der zehn Messungen beschrieben. Wie aus Abbildung 9 ersichtlich, flacht die VA-Zunahme im Zeitverlauf ab. Die Kurve steigt zunächst stetig an, nach etwa 20 min nimmt die Steigung ab. Nach 40 min nimmt die VA im Vergleich zur vorherigen VA nur noch gering zu, weshalb 40 min als Dunkeladaptationszeit, zu der die Augen ausreichend adaptiert sind, festgelegt wurde. Die skotopische VA betragen nach 5, 10, 20, 30, 40 und 50 min [decVA (logMAR)]: 0,05 (1,31); 0,06 (1,21); 0,07 (1,15); 0,07 (1,15); 0,08 (1,11); 0,08 (1,10).



**Abbildung 9:** Dunkeladaptationsverlauf. Dargestellt ist die Sehschärfe [logMAR] gegen die Zeit [min] für 10 Probanden. Die mittlere VA der zehn Probanden ist mit einem roten Punkt dargestellt. Die Ordinate ist invertiert, das heißt, dass die höhere VA im oberen Teil und die niedrigere VA im unteren Teil liegen.



#### **4.1.4 Lokale Diskussion**

In diesem Absatz wird eine Dunkeladaptationszeit von 40 min diskutiert. Bei Vergleich mit den Literaturwerten zeigte sich, dass eine 40 minütige Dunkeladaptation im oberen Referenzbereich lag: Die Dunkeladaptationszeit von elektrophysiologischen Messungen betrug 20 Minuten (McCulloch et al. 2015), Hecht (1920) bestimmte eine geeignete Dunkeladaptationszeit von 45-60 Minuten, Bartholomew et al. (2016) und Waugh und Levi (1993) von 25 Minuten und Jackson und Edwards (2008) und Owsley et al. (2014) von etwa 10 Minuten. Die VA-Zunahme war nach 20 Minuten nicht mehr sehr ausgeprägt, deshalb könnte eine kürzere Dunkeladaptationszeit in zukünftigen Studien in Betracht gezogen werden. Die in der Arbeit verwendete Dunkeladaptationszeit von 40 min erscheint für die breite klinische Anwendung zu lange.

## **4.2 Vorexperiment 2: Erste Versuchsmessungen**

### **4.2.1 Einleitung**

Die Messungen des Vorexperiments 2 dienten als Grundlage der kommenden Messungen. In der Literatur fanden sich wenige Quellen, die sich mit skotopischen Messungen beschäftigen. Deshalb basierte die entwickelte Methode zur Bestimmung der skotopischen Sehschärfe dieser Arbeit größtenteils auf den Erkenntnissen der standardisierten photopischen VA-Bestimmung (siehe *Material und Methoden*). In dem Vorexperiment 2 sollte die Durchführbarkeit beziehungsweise Übertragbarkeit dieser Methode auf die skotopische Sehschärfebestimmung untersucht werden. Die erhobenen Sehschärfen sollten als Referenzbasis für die kommenden Messungen dienen. Darüber hinaus sollte der Messaufbau auf Auflösungsgrenzeffekte untersucht werden, hierzu wurden die Sehschärfen zweier skotopischer Messentfernungen (0,5 m und 0,25 m) miteinander verglichen. Um eine Auflösungsgrenzeffekte („ceiling-effects“) auszuschließen, durften sich die Mittelwerte der Sehschärfe der beiden Messentfernungen nicht signifikant voneinander unterscheiden. Auflösungsgrenze bedeutete, dass der Pixel zu groß war, um ein Sehzeichen in einer bestimmten Größe noch scharf darzustellen.

### **4.2.2 Lokale Methodik**

Insgesamt zehn Probanden nahmen an dem Vorexperiment 2 teil. Die maximale Leuchtdichte betrug unter photopischen beziehungsweise skotopischen Messbedingungen 218 cd/m<sup>2</sup> beziehungsweise 0,0003 cd/m<sup>2</sup>. Als VA-Reiz wurde der Landolt-Ring verwendet (Bach 1996). Als HA-Reiz wurde der Zwei-Balkenreiz (Poggio et al. 1991) mit positiver Kontrasteinstellung

verwendet. Unter photopischen Bedingungen fanden vier Messungen (2xVA und 2xHA) und unter skotopischen Bedingungen sechs Messungen (2xVA und 2xHA aus 0,5 m und 1xVA und 1xHA aus 0,25 m) statt. Da die Probanden unerfahren waren, wurden vor den photopischen Messungen (1xHA) und während der Dunkeladaptionzeit (2xHA) Übungsdurchgänge durchgeführt. Die Messentfernung betrug unter photopischen Bedingungen 4 m und unter skotopischen Bedingungen 0,5 m beziehungsweise 0,25 m (siehe *Tabelle 1*). Um eine mögliche Auflösungsgrenzeffekte (sogenannter „ceiling-effect“) des Monitors zu prüfen, wurden zwei Messungen (1xVA und 1xHA) aus 0,25 m Entfernung - bei einer FrACT-Einstellung von 0,5 m - durchgeführt. Die mit diesen Einstellungen bestimmten Sehschärfen wurden anschließend halbiert, um mit den Sehschärfen bestimmt aus 0,5 m Entfernung - bei einer FrACT-Einstellung von 0,5 m - verglichen zu werden.

### **4.2.3 Ergebnisse**

Um Einflussfaktoren der Sehschärfe zu identifizieren wurden die Messwerte mit einer vier Faktor repeated-measure ANOVA analysiert. Die vier Faktoren waren (1) Sehtest (VA und HA), (2) Leuchtdichtebedingung (photopisch und skotopisch), (3) Messdurchgang (erster und zweiter Messdurchgang) und (4) skotopische Messentfernung (0,5 m und 0,25 m). In der repeated-measure ANOVA erwiesen sich der (1) Sehtest [ $F(1,9)=627,034$ ;  $P<0,001$ ] und die (2) Leuchtdichte [ $F(1,9)=349,355$ ;  $P<0,001$ ] als signifikante Einflussfaktoren. Der (3) Messdurchgang [ $F(1,9)=0,026$ ;  $P=0,876$ ] und die (4) skotopische Messentfernung [ $F(1,9)=4,459$ ;  $P=0,064$ ] erwiesen sich als nicht signifikante Einflussfaktoren.

Die weitere post-hoc-Analyse der signifikanten Einflussfaktoren erfolgte mit dem t-Test: Photopische VA und photopische HA ( $P_{0,02}<0,001$ ), photopische VA und skotopische VA ( $P_{0,025}<0,001$ ), photopische VA und skotopische HA ( $P_{0,05}=0,021$ ) sowie photopische und skotopische HA ( $P_{0,01}<0,001$ ) unterschieden sich signifikant voneinander.

Sehtest [Einheit]	logMAR	decVA	logMAR	decVA
Photopische VA	-0,16±0,03	1,45 [4 m]	Nicht erhoben	Nicht erhoben
Photopische HA	-0,89±0,07	7,76 [4 m]	Nicht erhoben	Nicht erhoben
Skotopische VA	1,12±0,02	0,08 [0,5 m]	1,28±0,03	0,05 [0,25 m]
Skotopische HA	-0,03±0,04	1,07 [0,5 m]	0,23±0,09	0,70[0,25 m]

**Tabelle 2: Sehschärfen des Vorexperiments 2.** Da der Messdurchgang keinen signifikanten Einflussfaktor darstellt, sind die Sehschärfen der beiden Messdurchgänge in der Tabelle 2 gemittelt. Die Sehschärfen sind in den Einheiten logMAR und decVA angegeben. Die Messentfernung in Meter ist in eckigen Klammern hinter dem decVA-Wert angegeben. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wird nur für die Einheit logMAR der SEM (Standardmessfehler) angegeben.

#### 4.2.4 Lokale Diskussion

In diesem Absatz werden der Sehtest und die Leuchtdichtebedingung als Einflussfaktoren der Sehschärfe diskutiert. Der Sehtest und die Leuchtdichtebedingung erweisen sich als signifikante Einflussfaktoren. Hieraus ließ sich folgern, dass der Sehtest und die Leuchtdichte einen Einfluss auf die Sehschärfe haben. Die vier Sehschärfebedingungen (photopische VA und HA sowie skotopische VA und HA) unterschieden sich signifikant voneinander. Dieses Ergebnis war plausibel bedenkt man, dass der VA und HA unterschiedliche Verarbeitungsmechanismen zugrunde liegen (siehe *Einführung*). Ein signifikanter Unterschied zwischen photopischer und skotopischer Sehschärfe erschien ebenfalls plausibel, bedenkt man, dass unter photopischen und skotopischen Leuchtdichtebedingungen unterschiedliche Rezeptoren aktiviert sind (Zapfen oder Stäbchen).

In diesem Absatz wird der Messdurchgang als fehlender signifikanter Einflussfaktor diskutiert, dies bedeutet, dass sich die Sehschärfen der beiden Messdurchgänge nicht signifikant voneinander unterschieden. Eine fehlenden Zunahme deutete auf einen fehlenden Lerneffekt hin, dieser ist jedoch sowohl für die photopische VA (Heinrich, Krüger, and Bach 2011) als auch die photopische HA (Fahle, Edelman, and Poggio 1995; Fahle and Edelman 1993) in vorherigen Studien beschrieben worden. In den Studien zeigte sich der Lerneffekt nach mehreren hundert Messungen. Das vorliegende Experimentdesign mit einer deutlich geringeren Anzahl an Messungen erschien deshalb nicht geeignet Lerneffekte nachzuweisen. Ein fehlender Lerneffekt könnte jedoch auch auf die Übungsdurchgänge vor den photopischen Messungen und während der Dunkeladaptationszeit zurückzuführen sein. Kommende Messungen sollten

die Notwendigkeit von Übungsdurchgängen untersuchen mit folgendem praktischen Hintergrund. Sehschärfemessungen unter skotopischen Leuchtdichtebedingungen sind ermüdend und führten dazu, dass nur eine reduzierte Anzahl an skotopischen Messungen möglich war. Ein Wegfallen des Ermüdungseffekts durch Übungsdurchgänge, ermöglichte eine größere Anzahl an skotopischen Messungen. Auch für die klinische Anwendung beziehungsweise die Anwendung in Studien ist die Fragestellung nach einem Übungsdurchgang wichtig.

In diesem Absatz wird die Messentfernung als nicht signifikanter Einflussfaktor der Sehschärfe diskutiert. Um Auflösungsgrenzeffekte des Monitors zu untersuchen wurden die skotopischen Sehschärfen bestimmt aus 0,5 m Entfernung mit den skotopischen Sehschärfen bestimmt aus 0,25 m Entfernung verglichen (siehe *Tabelle 2*). Um einen Auflösungsgrenzeffekt („ceiling-effects“) auszuschließen, durften die skotopische Messentfernung keinen signifikanten Einflussfaktor darstellen. Dies war der Fall, weshalb Auflösungsgrenzeffekte ausgeschlossen werden konnten. „Ceiling-effects“ traten beispielsweise bei Bartholomew et al. (2016) auf, bei deren photopischen VA-Messungen aufgrund der zu geringen Messentfernung bis zu 30% der Probanden den Auflösungsgrenzbereich erreichten.

### **4.3 Vorexperiment 3: Skotopische Messungen für zwei Messentfernungen**

#### **4.3.1 Einleitung**

Das Vorexperiment 3 sollte die in Vorexperiment 2 aufgetretenen Fragestellungen bezüglich der Notwendigkeit von Übungsdurchgängen für die Sehschärfebestimmung untersuchen. Darüber hinaus sollte der Einfluss einer höheren skotopischen Messentfernung auf die Sehschärfe untersucht werden. Hierzu wurden einige Modifikationen durchgeführt: (a) Die Anzahl der Messungen wurde reduziert. Da erfahrene Probanden teilnahmen, konnte auf Übungsdurchgänge verzichtet werden. (b) Es wurde neben den 0,5 m des Vorexperiments 2 eine weitere - höhere - skotopische Messentfernung von 1 m verwendet.

#### **4.3.2 Lokale Methodik**

Insgesamt acht erfahrene Probanden nahmen an dem Vorexperiment 3 teil. Die maximale Leuchtdichte betrug unter photopischen beziehungsweise skotopischen Messbedingungen 218 cd/m<sup>2</sup> beziehungsweise 0,0003 cd/m<sup>2</sup>. Als VA-Reiz wurde der Landolt-Ring verwendet (Bach 1996). Als HA-Reiz wurde der Zwei-Balkenreiz (Poggio et al. 1991) mit positiver

Kontrasteinstellung verwendet. Unter photopischen Bedingungen fanden zwei Messungen (1xVA und 1xHA) und unter skotopischen Bedingungen vier Messungen (2xVA und 2xHA) mit jeweils zwei Messungen (1xVA und 1xHA) für eine Messentfernung statt. Die Messentfernung betrug unter photopischen Bedingungen 4 m und unter skotopischen Bedingungen 0,5 m beziehungsweise 1 m (siehe *Tabelle 1*).

### 4.3.3 Ergebnisse

Um Einflussfaktoren der skotopischen Sehschärfe zu identifizieren, wurden die skotopischen Messwerte mit einer zwei Faktor repeated-measure ANOVA analysiert. Die zwei Faktoren waren (1) skotopischer Sehtest (skotopische VA und HA) und (2) skotopische Messentfernung (0,5 und 1 m). Der (1) skotopische Sehtest erwies sich als signifikanter Einflussfaktor [F(1,7)=855,531; P<0,001]. Die (2) skotopische Messentfernung erwies sich nicht als signifikanter Einflussfaktor [F(1,7)=1,801; P=0,222]. Die Interaktion der beiden Faktoren (1 und 2) war signifikant [F(1,7)=6,571; P=0,037].

Bei graphischer Darstellung durch Auftragen der beiden skotopischen Sehschärfen (VA und HA) gegen die beiden skotopischen Messentfernungen (0,5 m und 1 m), streuten die Sehschärfen gleichmäßig um die Winkelhalbierende. Die Punkte der skotopischen HA streuten stärker um die Winkelhalbierende, das heißt, dass die intraindividuelle HA-Differenz zwischen den beiden Messentfernungen größer als für die VA-Bestimmung war. Die Streubreite, durch den Standardmessfehlers (SEM) quantifiziert, war bei der VA-Bestimmung für 1 m ausgeprägter ( $\pm 0,04$  logMAR gegenüber  $\pm 0,02$  logMAR) und bei der HA-Bestimmung für 0,5 m ausgeprägter ( $\pm 0,05$  logMAR gegenüber  $\pm 0,04$  logMAR) (*Abbildung 10* und *Tabelle 3*).

Sehtest [Einheit]	logMAR	decVA	logMAR	decVA
Messentfernung [m]	0,5	0,5	1,0	1,0
Skotopische VA	1,14±0,02	0,07	1,12±0,04	0,08
Skotopische HA	-0,04±0,05	1,10	0,1±0,04	0,79

**Tabelle 3: Sehschärfen des Vorexperiments 3.** Die Sehschärfen sind in den Einheiten logMAR und decVA angegeben. Aus Gründen der Übersichtlichkeit ist der SEM (Standardmessfehler) nur für die Einheit logMAR angegeben.



(Leuchtdichte von  $3 \times 10^{-4}$  cd/m<sup>2</sup>) stimmte mit Studiendaten überein (Leuchtdichte von  $3,9 \times 10^{-4}$  cd/m<sup>2</sup> und 0,073 decVA) (Koenig 1897; Hecht 1928). Die Referenzstudie unterstrich die Qualität der erhobenen VA-Messdaten trotz der Verringerung der Messdurchgänge. Der Messaufbau sowie der -ablauf waren geeignet aussagekräftige VA-Messdaten zu erheben. Fraglich ist, inwiefern von der Qualität der VA-Messdaten Rückschlüsse auf die Qualität der HA-Messdaten erhoben werden konnten.

#### **4.4 Vorexperiment 4: HA-Bestimmung mit der Drei-Balkenreizmethode**

##### **4.4.1 Einleitung**

Nachdem in den Vorexperimenten 2 und 3 ein geeigneter Messablauf ermittelt wurde, sollte in dem Vorexperiment 4 der Einfluss des Messreizes (Zwei- versus Drei-Balkenreizmethode) auf die HA untersucht werden. In dem Vorexperiment 4 wurde die HA, in Analogie zu Livingstone und Hubel (1994), mithilfe der Drei-Balkenreizmethode bestimmt. Die gewonnenen Daten wurden mit den Ergebnissen des Vorexperiments 3 verglichen. Um eine Vergleichbarkeit mit dem Vorexperiment 3 zu ermöglichen, entsprachen Messaufbau und -ablauf des Vorexperiments 4 dem des Vorexperiments 3. Im Vorexperiment 3, in dem die Zwei-Balkenreizmethode angewandt wurde, bereitete das Erkennen der Balkenausrichtung den Probanden Schwierigkeiten, deshalb sollte untersucht werden, ob drei Balken die Aufgabe erleichterten. Ziel dieses Experiments war es die beiden Balkenreizmethoden miteinander zu vergleichen.

##### **4.4.2 Lokale Methodik**

Insgesamt acht erfahrene Probanden nahmen an dem Vorexperiment 4 teil. Die maximale Leuchtdichte betrug unter photopischen beziehungsweise skotopischen Messbedingungen 218 cd/m<sup>2</sup> beziehungsweise 0,0003 cd/m<sup>2</sup>. Als VA-Reiz wurde der Landolt-Ring verwendet (Bach 1996). Als HA-Reiz wurde der Drei-Balkenreiz (Livingstone und Hubel 1994) mit positiver Kontrasteinstellung verwendet. Unter photopischen und skotopischen Bedingungen fanden jeweils vier Messungen statt (2xVA und 2xHA). Da nur erfahrene Probanden teilnahmen, waren keine Übungsdurchgänge notwendig. Die Messentfernung unter photopischen Bedingungen betrug 4 m und unter skotopischen Bedingungen entweder 1 m oder 0,5 m. Für jede der beiden skotopischen Messentfernungen wurden jeweils einmal die VA und die HA bestimmt (siehe *Tabelle 1*).

### 4.4.3 Ergebnisse

Die Messdaten des Vorexperiments 4 wurden unter zwei Gesichtspunkten analysiert: (a) Analyse der skotopischen Messentfernung als Einflussfaktor der skotopischen Sehschärfe. (b) Analyse der Balkenreizmethode als Einflussfaktor der HA.

#### 4.4.3.1 Analyse der skotopischen Messentfernung als Einflussfaktor der skotopischen Sehschärfe

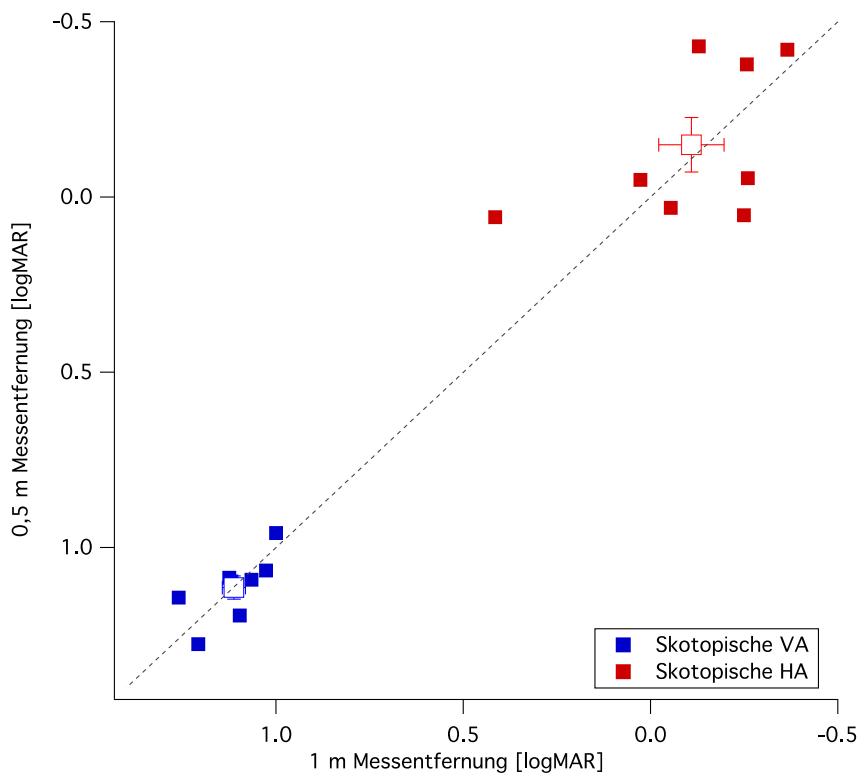
Um Einflussfaktoren der skotopischen Sehschärfe zu identifizieren, wurden die skotopischen Messwerte mit einer zwei Faktor repeated-measure ANOVA analysiert. Die zwei Faktoren waren (1) skotopischer Sehtest (skotopische VA und HA) und (2) skotopische Messentfernung (0,5 und 1 m). Der (1) skotopische Sehtest erwies sich als signifikanter Einflussfaktor [ $F(1,7)=251,663$ ;  $P<0,001$ ]. Die (2) skotopische Messentfernung erwies sich als nicht signifikanter Einflussfaktor [ $F(1,7)=0,200$ ;  $P=0,668$ ]. In Tabelle 4 sind die genannten Unterschiede angegeben.

Bei graphischer Darstellung durch Auftragen der Messwerte der beiden skotopischen Messentfernungen (0,5 m und 1 m) gegeneinander, streuten die Sehschärfen gleichmäßig um die Winkelhalbierende (*Abbildung 11*). Die Punkte der skotopischen HA streuten stärker um die Winkelhalbierende, das heißt, dass die intraindividuelle HA-Differenz zwischen den beiden Messentfernungen größer als für die VA-Bestimmung war. Die Streubreite, durch den Standardmessfehler (SEM) quantifiziert, war bei der VA-Bestimmung für beide Messentfernungen ( $\pm 0,03$  logMAR) gleich und bei der HA-Bestimmung für 1 m etwas ausgeprägter ( $\pm 0,09$  logMAR gegenüber  $\pm 0,08$  logMAR)



Sehtest +Messentfernung	logMAR	decVA
Photopische VA (MW)	-0,15±0,02	1,41
Photopische HA (MW)	-1,14±0,04	13,8
Skotopische VA aus 0,5 m	1,11±0,03	0,08
Skotopische VA aus 1,0 m	1,11±0,03	0,08
Skotopische HA aus 0,5 m	-0,15±0,08	1,41
Skotopische HA aus 1,0 m	-0,11±0,09	1,29

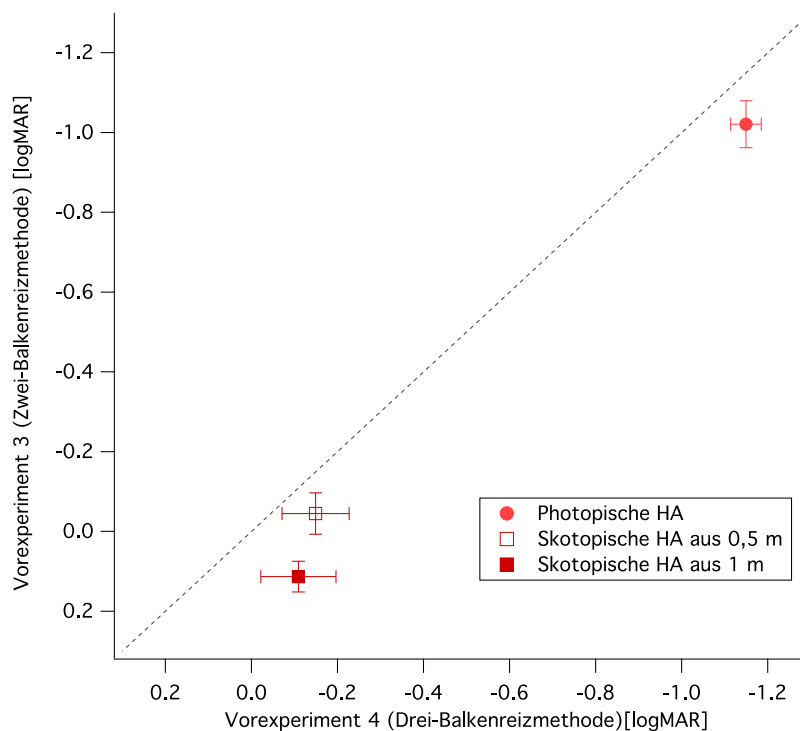
**Tabelle 4: Sehschärfen des Vorexperiments 4.** Die Sehschärfen sind in den Einheiten logMAR und decVA angegeben. Aus Gründen der Übersichtlichkeit ist der SEM (Standardmessfehler) nur für die Einheit logMAR angegeben.



**Abbildung 11: Vergleich der beiden Messentfernungen miteinander.** Auftragen der beiden Messentfernungen (0,5 m und 1 m) gegeneinander. Die Achsen sind invertiert, sodass die höchste Sehschärfe (photopische HA) rechts oben und die geringste Sehschärfe (skotopische VA) links unten liegen. Die vergrößerten Zeichen symbolisieren die Mittelwerte, außerdem wird der SEM (Standardmessfehler) mithilfe von Balken angegeben, die nicht immer über die Symbole hinausreichen.

#### 4.4.3.2 Analyse der Balkenreizmethode als Einflussfaktor der HA

Um Einflussfaktoren der HA zu identifizieren, wurden die skotopischen HA-Messwerte der Vorexperimente 3 und 4 mit einer zwei Faktor repeated-measure ANOVA analysiert. Die zwei Faktoren waren (1) Messentfernung (0,5 m und 1 m) und (2) Balkenreizmethode (Zwei- und Drei-Balkenreizmethode). Die (1) Messentfernung erwies sich als nicht signifikanter Einflussfaktor [F(1,7)=3,343; P=0,110]. Die (2) Balkenreizmethode erwies sich als nicht signifikanter Einflussfaktor [F(1,7)=4,700; P=0,067]. Bei graphischer Darstellung durch Auftragen der HA-Mittelwerte der beiden Vorexperimente (3 und 4) gegeneinander lagen die Punkte unterhalb der Winkelhalbierenden (Abbildung 12). Die Mittelwerte der Drei-Balkenreizmethode waren höher als die der Zwei-Balkenreizmethode. Die Streubreite, durch den Standardmessfehlers (SEM) quantifiziert, war für die Drei-Balkenreizmethode größer (für 0,5 m: 0,08 logMAR gegenüber 0,05 logMAR und für 1 m: 0,09 logMAR gegenüber 0,04 logMAR).



**Abbildung 12: Vergleich der HA-Sehschärfen der Zwei- und Drei-Balkenreizmethode miteinander.** In dem Graphen sind die Sehschärfen der Zwei-Balkenreizmethode (Vorexperiment 3) und der Drei-Balkenreizmethode (Vorexperiment 4) dargestellt. Die Achsen sind invertiert, sodass die höchste Sehschärfe (photopische HA) rechts oben und die geringste Sehschärfe (skotopische HA) links unten liegen. Die vergrößerten Zeichen symbolisieren die Mittelwerte  $\pm$  des Standardmessfehlers (zum Teil kleiner als die Symbolgröße). Da die Sehschärfen der beiden Experimente an einem unterschiedlichen Probandenpool ermittelt wurden, ist der Mittelwerte angegeben.

#### **4.4.4 Lokale Diskussion**

In diesem Absatz wird die Messentfernung, als nicht signifikanter Einflussfaktor der skotopischen Sehschärfe, diskutiert. Hieraus ließ sich ableiten, dass die beiden skotopischen Messentfernungen gleichwertig waren. Die Ergebnisse aus dem Vorexperiment 3 ließen sich also auch für die Drei-Balkenreizmethode reproduzieren. Ich verwendete für die kommenden Experimente ein skotopische Messentfernung von 1 m.

In diesem Absatz wird die Streuungsbreite diskutiert. Im Unterschied zu Vorexperiment 3 bestand keine Differenz zwischen den VA Streuungsbreiten (der Standardmessfehler war für beide Messentfernungen  $\pm 0,03$  logMAR). Die HA Streuungsbreite unterschieden sich ebenfalls nur gering (0,09 beziehungsweise 0,08 logMAR). Es zeigte sich – bei Vergleich der Streuungsbreiten der beiden Balkenreizmethoden miteinander – eine höhere Streuungsbreite der Drei-Balkenreizmethode (für 0,5 m: 0,08 gegenüber 0,05 logMAR; für 1 m: 0,09 gegenüber 0,04 logMAR). Unter diesem Gesichtspunkt erschien die Zwei-Balkenreizmethode im Vergleich zur Drei-Balkenreizmethode vorteilhafter zur HA-Bestimmung.

In diesem Absatz wird die Balkenreizmethode, als nicht signifikanter Einflussfaktor der HA, diskutiert. Hieraus lässt sich schließen, dass die beiden Balkenreizmethoden gleichwertig waren. In der graphischen Analyse zeigte sich jedoch ein höheres HA-Auflösungsvermögen der Drei-Balkenreizmethode. Möglicherweise ließe sich bei einer größeren Probandenzahl ein signifikanter Einfluss nachweisen. Ein Vorteil der Drei-Balkenreizmethode war - laut Probandenaussage – das einfachere Erkennen der Balkenausrichtung und die geringere Ermüdung während des Messdurchgangs. Ich verwendete für die kommenden Experimente die Drei-Balkenreizmethode aufgrund der beiden oben genannten Gründe, diese Gründe ließen sich jedoch nicht statistisch belegen.

### **4.5 Vorexperiment 5: HA-Bestimmung mit der Drei-Balkenreizmethode für zwei Kontrastpolaritäten**

#### **4.5.1 Einleitung**

Nachdem in den vorherigen Experimenten der Einfluss des Sehreizes auf die HA untersucht wurde, sollte in dem Vorexperiment 5 der Einfluss der Kontrastpolarität auf die Sehschärfe untersucht werden. Deshalb wurden VA und HA für die - in den vorherigen Experimenten bereits verwendete - positive Kontrastpolarität und die negative Kontrastpolarität (Livingstone

und Hubel 1994) bestimmt. Ein Einfluss der Kontrastpolarität erscheint plausibel, wie zum Beispiel eine alltägliche Beobachtung nahelegt. So erkennt man im Dunkeln leichter einen hellen Gegenstand auf einer dunklen Fläche (negative Kontrastpolarität) als umgekehrt einen dunklen Gegenstand auf einer hellen Fläche (positive Kontrastpolarität) (Cordingley and Fletcher 1961; Weale 1975). Es galt zu untersuchen, ob sich eine derartige Beobachtung auch unter experimentellen Bedingungen nachweisen ließ. Die in der Arbeit entwickelten Methoden sollten langfristig in klinischen Studien an Sehkranken angewendet werden. Zeigte sich ein Einfluss der Kontrastpolarität bei Sehgesunden, so könnte dieser Einfluss bei Sehkranken, in positiver Hinsicht, noch ausgeprägter sein.

#### **4.5.2 Lokale Methodik**

Insgesamt sechszehn Probanden nahmen an dem Vorexperiment 5 teil. Von den sechszehn Probanden hatten acht Probanden noch nicht an vorherigen Messreihen teilgenommen (unerfahrene Probanden). Deshalb wurde diese Probandengruppe zweimal, an zwei verschiedenen Tagen, gemessen, um Lerneffekte zu untersuchen. Die maximale Leuchtdichte betrug unter photopischen beziehungsweise skotopischen Messbedingungen  $218 \text{ cd/m}^2$  beziehungsweise  $0,0003 \text{ cd/m}^2$ . Als VA-Reiz wurde der Landolt-Ring mit positiver und negativer Kontrastpolarität verwendet (Bach 1996). Als HA-Reiz wurde der Drei-Balkenreiz (Livingstone und Hubel 1994) mit positiver und negativer Kontrasteinstellung verwendet. Unter photopischen und skotopischen Bedingungen fanden jeweils vier Messungen statt (2xVA und 2xHA). Es wurden keine Übungsdurchgänge durchgeführt. Die Messentfernung unter photopischen Bedingungen betrug 4 m und unter skotopischen Bedingungen 1 m. Für jede Kontrastpolarität wurden jeweils einmal die VA und die HA bestimmt (siehe *Tabelle 1*).

#### **4.5.3 Ergebnisse**

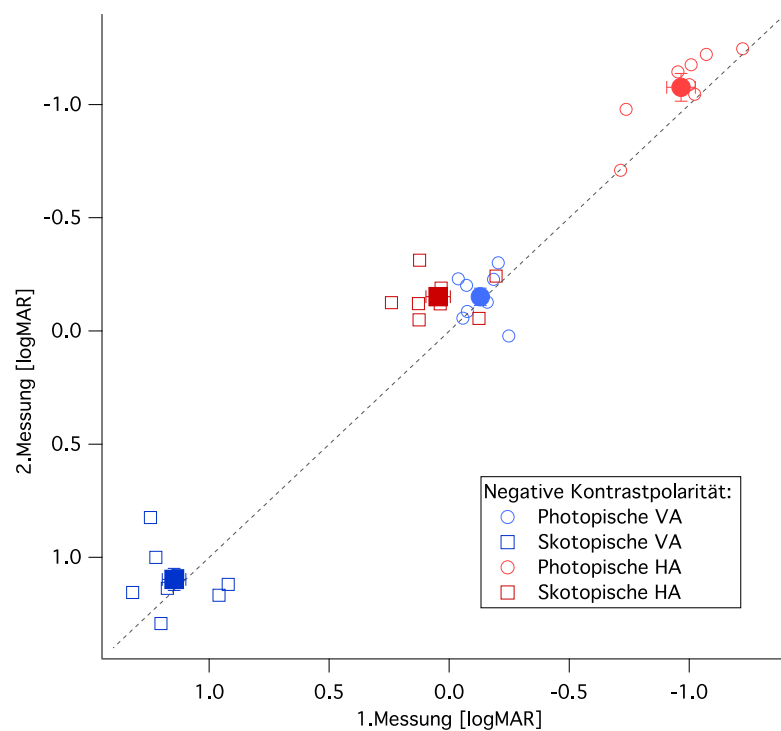
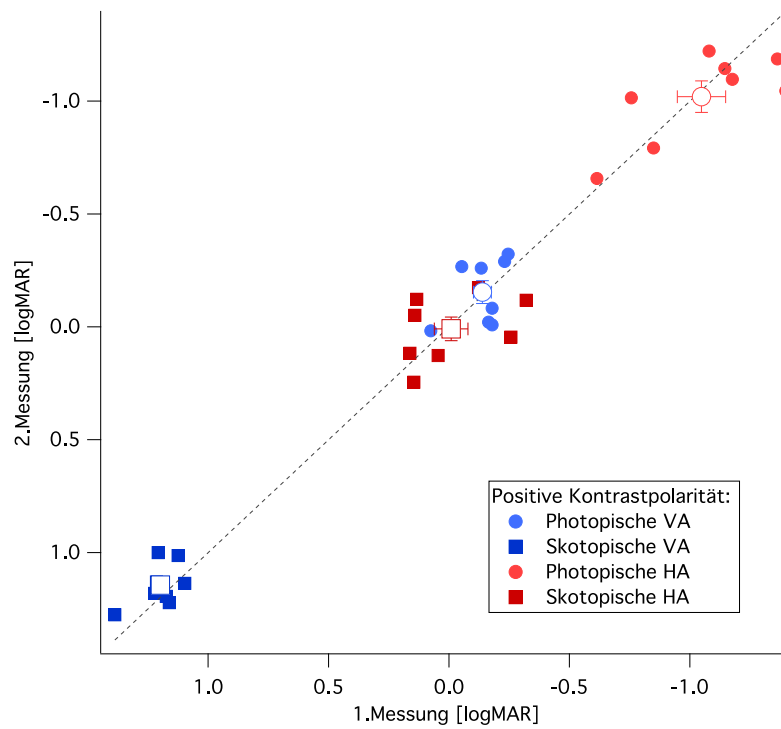
Die bestimmten Sehschärfen wurden unter folgenden Gesichtspunkten analysiert: (a) Einfluss des Messtages auf die Sehschärfe. Als Grundlage dienten die Sehschärfen der unerfahrenen Probanden, die zweimal – an unterschiedlichen Tagen - bestimmten wurden. (b) Einfluss der Kontrastpolarität auf die Sehschärfe. Als Grundlagen dienten die Sehschärfen der acht erfahrenen Probanden sowie die Sehschärfen des zweiten Durchgangs der unerfahrenen Probanden.

#### 4.5.3.1 Einfluss des Messtages auf die Sehschärfe

Die statistische Analyse erfolgte mit den Sehschärfen der unerfahrenen Probanden, die zweimal – an unterschiedlichen Tagen - bestimmten wurden. Um Einflussfaktoren der Sehschärfe zu identifizieren, wurden die Messwerte mit einer vier Faktor repeated-measure ANOVA analysiert. Die vier Faktoren waren der (1) Sehtest (VA und HA), die (2) Leuchtdichtebedingung (photopische und skotopische), die (3) Kontrastpolarität (positiv und negativ) und der (4) Messdurchgang (erster und zweiter Messtag). Der (1) Sehtest [F(1,7)=1123,942; P<0,001] und die (2) Leuchtdichtebedingung [F(1,7)=1076,293; P<0,001] zeigten sich als signifikanter Einflussfaktor. Die (3) Kontrastpolarität [F(1,7)=0,565; P=0,477] und der (4) Messdurchgang [F(1,7)=3,496; P=0,104] erwiesen sich als nicht signifikante Einflussfaktoren. Die Messwerte sind in Tabelle 5 angegeben. Bei graphischer Darstellung durch Auftragen der Messwert der beiden Messdurchgänge (erster und zweiter Tag) gegeneinander, getrennt für die jeweilige Kontrastpolarität betrachtet, streuten die Sehschärfen gleichmäßig um die Winkelhalbierende (*Abbildung 13*).

	1.Messtag		2. Messtag	
	logMAR	decVA	logMAR	decVA
<b>Sehtest +Kontrastpolarität (KP)</b>				
<b>Photopische VA (Positive KP)</b>	-0,14±0,04	1,38	-0,15±0,05	1,41
<b>Photopische HA (Positive KP)</b>	-1,05±0,10	11,22	-1,02±0,07	10,47
<b>Skotopische VA (Positive KP)</b>	1,20±0,03	0,06	1,14±0,03	0,07
<b>Skotopische HA (Positive KP)</b>	-0,01±0,07	1,00	0,01±0,05	0,98
<b>Photopische VA (Negative KP)</b>	-0,13±0,03	1,35	-0,15±0,04	1,41
<b>Photopische HA (Negative KP)</b>	-0,97±0,06	9,33	-1,08±0,06	12,02
<b>Skotopische VA (Negative KP)</b>	1,14±0,05	0,07	1,10±0,48	0,08
<b>Skotopische HA (Negative KP)</b>	0,05±0,05	0,89	-0,15±0,03	1,41

**Tabelle 5: Sehschärfen der unerfahrenen Probanden (Vorexperiment 5).** Es sind die Sehschärfen des ersten und zweiten Messtages dargestellt. Die Sehschärfen sind in den Einheiten logMAR und decVA angegeben. Aus Gründen der Übersichtlichkeit ist der SEM (Standardmessfehler) nur für die Einheit logMAR angegeben.



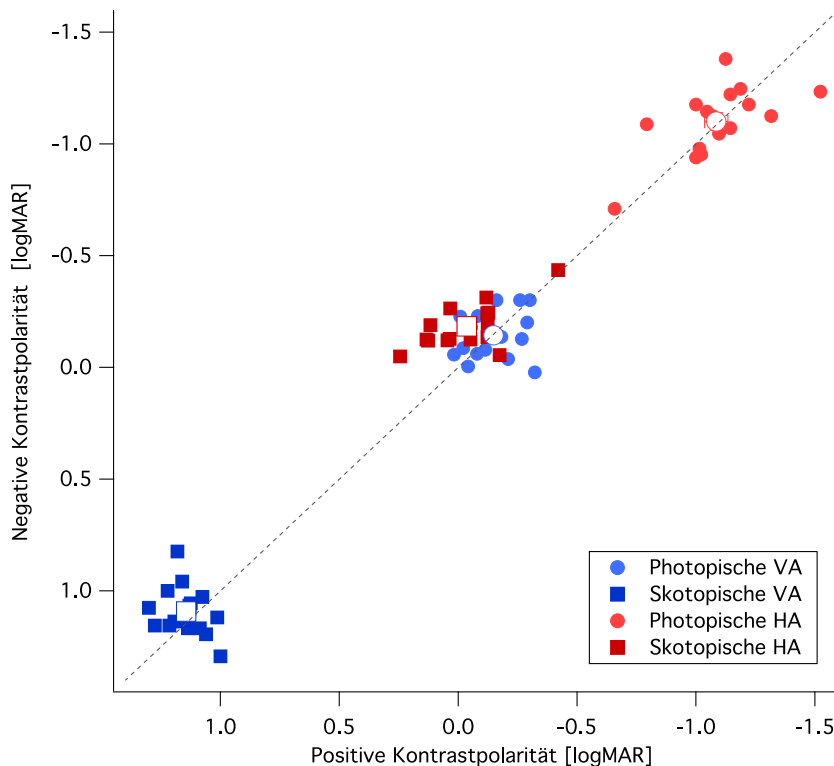
**Abbildung 13: Vergleich der Sehschärfen der beiden Messdurchgänge miteinander.** Auftragen der Sehschärfen des ersten und zweiten Messtages gegeneinander. Die jeweiligen Kontrastpolaritäten sind gesondert betrachtet. Die Achsen sind invertiert, sodass die höchste Sehschärfe (photopische HA) rechts oben und die geringste Sehschärfe (skotopische VA) links unten liegen. Die vergrößerten Zeichen symbolisieren die Mittelwerte, außerdem wird der SEM (Standardmessfehler) mithilfe von Balken angegeben, die nicht immer über die Symbole hinausreichen.

#### 4.5.3.2 Einfluss der Kontrastpolarität auf die Sehschärfe.

Die statistische Analyse erfolgte mit den Sehschärfen der erfahrenen Probanden und den Sehschärfen des zweiten Messtages der unerfahrenen Probanden. Um Einflussfaktoren der Sehschärfe zu identifizieren, wurden die Messwerte mit einer drei Faktor repeated-measure ANOVA analysiert. Die drei Faktoren waren der (1) Sehtest (VA und HA), die (2) Leuchtdichtebedingung (photopische und skotopische) und die (3) Kontrastpolarität (positiv und negativ). Der (1) Sehtest [ $F(1,15)=2230,610$ ;  $P<0,001$ ], die (2) Leuchtdichtebedingung [ $F(1,15)=1973,865$ ;  $P<0,001$ ] und die (3) Kontrastpolarität [ $F(1,15)=5,688$ ;  $P=0,031$ ] zeigten sich als signifikante Einflussfaktor. Die weitere Analyse der signifikanten Faktoren erfolgte mit dem t-Test: Die skotopischen HA-Messwerte der beiden Kontrastpolaritäten unterschieden sich signifikant voneinander ( $P_{0,013}<0,001$ ). Für die restlichen Sehschärfebedingungen zeigte sich kein signifikanter Unterschied zwischen den beiden Kontrastpolaritäten ( $P=0,211$ ). In Tabelle 6 sind die genannten Unterschiede angegeben. Die Streubreiten beziehungsweise der Standardmessfehler sind für die Messwerte der negativen Kontrastpolarität geringer (siehe *Tabelle 6*). Bei graphischer Darstellung durch Auftragen der beiden Kontrastpolaritäten (positive und negative Kontrastpolarität) gegeneinander streuten die photopische VA, skotopische VA und photopische HA gleichmäßig um die Winkelhalbierende. Die Messwerte der skotopischen HA lagen größtenteils (15 von 16 Werten) oberhalb der Winkelhalbierenden (*Abbildung 14*).

Kontrastpolarität (KP)	Positive KP		Negative KP	
	logMAR	decVA	logMAR	decVA
Photopische VA	-0,15±0,03	1,41	-0,14±0,03	1,38
Photopische HA	-1,09±0,05	12,30	-1,10±0,04	12,59
Skotopische VA	1,14±0,09	0,07	1,09±0,03	0,08
Skotopische HA	<b>-0,04±0,04</b>	<b>0,91</b>	<b>-0,18±0,03</b>	<b>1,51</b>

**Tabelle 6: Sehschärfen des Vorexperiments 5.** Die dargestellten Sehschärfen stammen von den acht erfahrenen Probanden sowie den Sehschärfen des zweiten Durchgangs der unerfahrenen Probanden. Die Sehschärfen sind in den Einheiten logMAR und decVA angegeben. Aus Gründen der Übersichtlichkeit ist der SEM (Standardmessfehler) nur für die Einheit logMAR angegeben. Signifikant unterschiedliche Sehschärfen sind fett gedruckt ( $P_{0,013}<0,001$  siehe Text).



**Abbildung 14: Vergleich der Sehschärfen der beiden Kontrastpolaritäten miteinander.** In dem Graphen sind die Sehschärfen der beiden Kontrastpolaritäten dargestellt. Die Achsen sind invertiert, sodass die höchste Sehschärfe (photopische HA) rechts oben und die geringste Sehschärfe (skotopische VA) links unten liegen. Die vergrößerten Zeichen symbolisieren die Mittelwerte  $\pm$  des Standardmessfehlers (zum Teil kleiner als die Symbolgröße).

#### 4.5.4 Lokale Diskussion

In diesem Absatz wird der Einfluss des Messdurchgangs (des ersten und zweiten Messtages) auf die Sehschärfe diskutiert. Der Messdurchgang zeigte sich nicht als signifikanter Einflussfaktor, hieraus lässt sich schließen, dass sich die Messwerte der beiden Messtage nicht signifikant voneinander unterscheiden. Es ließen sich keine Lerneffekte nachweisen, diese Erkenntnis stimmt mit der der vorherigen Vorexperimente überein. Im Hinblick auf die Entwicklung eines geeigneten Studiendesigns, ließ sich schließen, dass keine Übungsdurchgänge notwendig sind.

In diesem Absatz wird der Einfluss der Kontrastpolarität (der positiven und negativen Kontrastpolarität) auf die Sehschärfe diskutiert. Die Kontrastpolarität erwies sich für die skotopische HA als signifikanter Einflussfaktor, hieraus lässt sich schließen, dass die Messwerte der negativen Kontrastpolarität signifikant besser als die Messwerte der positiven Kontrastpolarität waren (Eine ausführliche Diskussion der Kontrastpolarität ist im Teil



*Diskussion auf den Seiten 62ff. zu finden*). In diesem Absatz wird nur der Einfluss der Erkenntnis auf die Entwicklung der Messmethodik diskutiert. Es zeigte sich ebenfalls eine geringere Streubreite der Messwerte der negativen Kontrastpolarität. Die negative Kontrastpolarität erschien im Vergleich zur positiven Kontrastpolarität geeigneter für die HA-Bestimmung. Im Rahmen einer Bachelorarbeit, basierende auf den Erkenntnissen dieses Vorexperiments 5, wurden die Messungen mit Filtern einer höheren Abbildungsqualität wiederholt (Kramer 2018). Hierbei ließ sich ein signifikant positiver Einfluss ( $P < 0,001$ ) der negativen Kontrastpolarität verglichen mit der positiven Kontrastpolarität auf die photopische HA nachweisen ( $P < 0,001$ ). Für die anderen drei Sehschärfebedingungen (photopische VA, skotopische VA und HA) ließ sich kein Einfluss der Kontrastpolarität auf die Sehschärfe nachweisen ( $P = 0,057$ ). Das Ergebnis des Vorexperiment 5 ließ sich also in einer folgenden Studie unter einer verbesserten Abbildungsqualität nicht reproduzieren. Die verringerte Abbildungsqualität scheint einen Einfluss auf den Effekt der Kontrastpolarität auf die Sehschärfe zu haben.

#### **4.6 Vorexperiment 6: Erneute Messung des Vorexperiments 5 unter einer zehnfach höheren Leuchtdichte**

##### **4.6.1 Einleitung**

Nachdem sich im Vorexperiment 5 ein Einfluss der Kontrastpolarität auf die Sehschärfe nachweisen ließ, hatte das Vorexperiment 5 zwei Ziele: (a) Es sollte untersucht werden, ob sich ebenfalls ein Einfluss der Kontrastpolarität auf die Sehschärfe unter einer etwa zehnfach höheren Leuchtdichtebedingung nachweisen ließ. (b) Es sollte untersucht werden, welchen Einfluss eine etwa zehnfache Erhöhung der Leuchtdichte auf  $0,003 \text{ cd/m}^2$  auf die Sehschärfe hat. Ich verwendete die Leuchtdichte in Analogie zu Barton et al. (2017). Barton et al. maßen bei einer Leuchtdichte von  $0,003 \text{ cd/m}^2$  im funktionellen Magnetresonanztomographen ein Zentralskotom. Unter höheren skotopischen Leuchtdichtebedingungen könnten die Sehtests weniger ermüdend sein, was eine größere Anzahl an Messungen und von Ermüdungseffekten weniger beeinflusste Sehschärfemesswerte bedingen dürfte.

##### **4.6.2 Lokale Methodik**

Insgesamt zehn erfahrene Probanden nahmen an dem Vorexperiment 6 teil. Die maximale Leuchtdichte betrug unter photopischen beziehungsweise skotopischen Messbedingungen 218

cd/m<sup>2</sup> beziehungsweise 0,003 cd/m<sup>2</sup>. Als VA-Reiz wurde der Landolt-Ring mit positiver und negativer Kontrastpolarität verwendet (Bach 1996). Als HA-Reiz wurde der Drei-Balkenreiz (Livingstone und Hubel 1994) mit positiver und negativer Kontrastpolarität verwendet. Unter photopischen und skotopischen Bedingungen fanden jeweils vier Messungen statt (2xVA und 2xHA). Es wurden keine Übungsdurchgänge durchgeführt. Die Messentfernung unter photopischen Bedingungen betrug 4 m und unter skotopischen Bedingungen 1 m. Für jede Kontrastpolarität wurden jeweils einmal VA und HA bestimmt (siehe Tabelle 1 auf Seite 26).

### 4.6.3 Ergebnisse

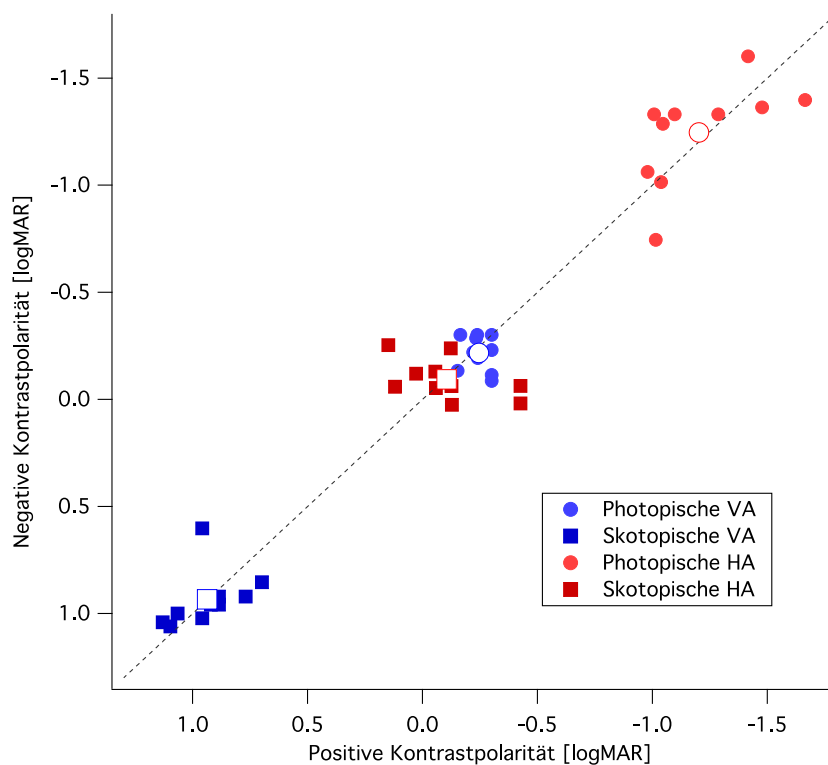
In diesem Vorexperiment sollten folgende Einflussfaktoren der Sehschärfe analysiert werden: (a) Es wurde der Einfluss der Kontrastpolarität auf die Sehschärfe analysiert. Es sollte untersucht werden, ob sich eine Kontrastdiskrepanz wie im Vorexperiment 5 zeigte. (b) Es wurde der Einfluss der Leuchtdichte auf die Sehschärfe untersucht, indem die Sehschärfen des Vorexperiment 5 (0,0003 cd/m<sup>2</sup>) und des Vorexperiments 6 (0,003 cd/m<sup>2</sup>) miteinander verglichen wurden.

#### 4.6.3.1 Einfluss der Kontrastpolarität auf die Sehschärfe

Um Einflussfaktoren der Sehschärfe zu identifizieren, wurden die Messwerte mit einer drei Faktor repeated-measure ANOVA analysiert. Die drei Faktoren waren der (1) Sehtest (VA und HA), die (2) Leuchtdichtebedingung (photopische und skotopische) und die (3) Kontrastpolarität (positiv und negativ). Der (1) Sehtest [F(1,9)=883,231 P<0,001] und die (2) Leuchtdichtebedingung [F(1,9)=1035,989; P<0,001] zeigten sich als signifikante Einflussfaktoren. Die (3) Kontrastpolarität [F(1,9)=0,002; P=0,961] erwies sich als nicht signifikanter Einflussfaktor. In Tabelle 7 sind die genannten Unterschiede angegeben. Bei graphischer Darstellung durch Auftragen der beiden Kontrastpolaritäten (positive und negative Kontrastpolarität) gegeneinander streuten die Messwerte gleichmäßig um die Winkelhalbierende (*Abbildung 15*).

Kontrastpolarität (KP)	Positive KP		Negative KP	
Sehtest	logMAR	decVA	logMAR	decVA
Photopische VA	-0,25±0,02	1,79	-0,22±0,03	1,70
Photopische HA	-1,20±0,08	15,80	-1,25±0,08	17,78
Skotopische VA	0,94±0,04	0,11	0,93±0,04	0,12
Skotopische HA	-0,10±0,06	1,26	-0,09±0,03	1,23

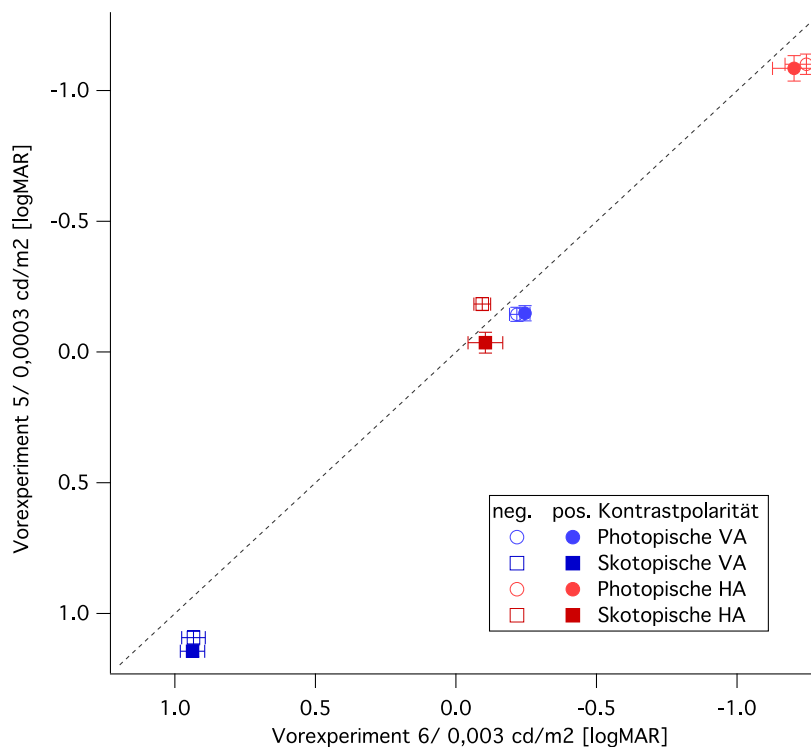
**Tabelle 7: Sehschärfe des Vorexperiments 5.** Die Sehschärfen sind in den Einheiten logMAR und decVA angegeben. Aus Gründen der Übersichtlichkeit ist der SEM (Standardmessfehler) nur für die Einheit logMAR angegeben.



**Abbildung 15: Vergleich der Sehschärfen der beiden Kontrastpolaritäten miteinander.** In dem Graphen sind die Sehschärfen der beiden Kontrastpolaritäten dargestellt. Die Achsen sind invertiert, sodass die höchste Sehschärfe (photopische HA) rechts oben und die geringste Sehschärfe (skotopische VA) links unten liegen. Die vergrößerten Zeichen symbolisieren die Mittelwerte.

#### 4.6.3.2 Einfluss der Leuchtdichte auf die Sehschärfe

In diesem Absatz wird der Einfluss der Leuchtdichte auf die Sehschärfe untersucht. Hierzu wurden die Sehschärfen des Vorexperiments 5 ( $0,0003 \text{ cd/m}^2$ ) und des Vorexperiments 6 ( $0,003 \text{ cd/m}^2$ ) analysiert. Um Einflussfaktoren der Sehschärfe zu identifizieren wurden die Messwerte mit einer vier Faktor repeated-measure ANOVA analysiert. Die vier Faktoren waren der (1) Sehtest (VA und HA), die (2) Leuchtdichtebedingung (photopische und skotopische), die (3) Kontrastpolarität (positiv und negativ) und die (4) Leuchtdichte ( $0,0003 \text{ cd/m}^2$  und  $0,003 \text{ cd/m}^2$ ). Der (1) Sehtest [ $F(1,9)=2117,931$   $P<0,001$ ] und die (2) Leuchtdichtebedingung [ $F(1,9)=2423,650$ ;  $P<0,001$ ] zeigten sich als signifikante Einflussfaktoren. Die (3) Kontrastpolarität [ $F(1,9)=0,371$ ;  $P=0,371$ ] und die (4) Leuchtdichte [ $F(1,9)=0,204$ ;  $P=0,068$ ] zeigten sich als nicht signifikante Einflussfaktoren. Bei graphischer Darstellung durch Auftragen der Mittelwerte der beiden Vorexperimente (5 und 6) gegeneinander, lagen diese, mit Ausnahme der skotopischen HA negativer Kontrastpolarität, unterhalb der Winkelhalbierenden (*Abbildung 16*).



**Abbildung 16: Vergleich der Sehschärfen von Vorexperiment 5 und 6 miteinander.** In diesem Graphen sind die Sehschärfen des Vorexperiments 5 gegen die Sehschärfen des Vorexperiments 6 aufgetragen. Die Achsen sind invertiert, sodass die höchste Sehschärfe (photopische HA) rechts oben und die geringste Sehschärfe (skotopische VA) links unten liegen. Die vergrößerten Zeichen symbolisieren die Mittelwerte  $\pm$  des Standardmessfehlers (zum Teil kleiner als die Symbolgröße). Da die Sehschärfen der beiden Experimente an einem unterschiedlichen Probandenpool ermittelt wurden, ist der Mittelwert angegeben. Die gefärbten Zeichen symbolisieren die Sehschärfe der positiven Kontrastpolaritäten, die nicht gefärbten Zeichen die Sehschärfe der negativen Kontrastpolaritäten.

#### 4.6.4 Lokale Diskussion

In diesem Absatz wird der Einfluss der Kontrastpolarität auf die Sehschärfe diskutiert. In dem Vorexperiment 6 zeigte sich die Kontrastpolarität als nicht signifikanter Einflussfaktor. Hieraus lässt sich schließen, dass sich die Messwerte der beiden Kontrastpolaritäten nicht signifikant voneinander unterscheiden. Die Ergebnisse standen im Widerspruch zu denen des vorherigen Vorexperiments, in dem sich ein signifikanter Einfluss der Kontrastpolarität auf die skotopische HA nachweisen ließ. In Studien zeigte sich ein positiver Einfluss der Kontrastpolarität bei älteren Probanden (Westheimer et al. 2003) und bei Medientrübungen des Auges (Wesemann), also vereinfacht gesagt, bei einer reduzierten Abbildungsqualität (siehe hierzu auch *Diskussion S. 62ff.*). Möglicherweise war die skotopische Abbildungsqualität - bedingt durch die zehnfach höheren Leuchtdichte - im Vorexperiment 6 besser als im Vorexperiment 5. Unter diesen verbesserten Darstellungsbedingungen trat deshalb der positive Effekt der negativen Kontrastpolarität nicht zutage. Man konnte dieses Ergebnis auch als Bestätigung sehen,

skotopische Messungen unter einer höheren skotopischen Leuchtdichte durchzuführen, weil hierunter die Abbildungsqualität besser war. Das anschließende Hauptexperiment wurde deshalb unter einer vergleichbaren skotopischen Leuchtdichte durchgeführt.

In diesem Absatz wird der Einfluss der Leuchtdichte auf die Sehschärfe diskutiert. Die Leuchtdichte zeigte sich nicht als signifikanter Einflussfaktor der Sehschärfe, hieraus ließ sich ableiten, dass sich die Sehschärfen die beiden Vorexperimente nicht signifikant voneinander unterschieden. In der graphischen Analyse zeigte sich jedoch im Mittel eine Zunahme der Sehschärfen zugunsten der höheren Leuchtdichte. König beschrieb eine Zunahme der Sehschärfe (von 0,72 decVA auf 0,12 decVA) bei einer zunehmenden Leuchtdichte (von 0,0004 cd/m<sup>2</sup> auf 0,003 cd/m<sup>2</sup>) (König 1897; Hecht 1928). In der Studie wurde jedoch nicht benannt, ob die Zunahme signifikant war. Möglicherweise zeigt sich ein signifikanter Unterschied bei einer erneuten Wiederholung des Experiments mit einer höheren Probandenzahl.

#### **4.7 Hauptexperiment: Messung der skotopischen VA und HA bei einer Leuchtdichte von 0,004 cd/m<sup>2</sup> und bei erhöhter Abbildungsqualität**

##### **4.7.1 Einleitung**

In den vorherigen sechs Vorexperimenten wurden der Einfluss experimenteller Faktoren auf die Sehschärfe untersucht. Das besondere Augenmerk wurde auf Einflussfaktoren der skotopischen Sehschärfe gelegt, da es hierzu wenige Erkenntnisse gab. Mithilfe der gewonnenen Erkenntnisse wurde ein geeigneter Messaufbau- sowie -ablauf zur Bestimmung der VA und HA unter photopischen und skotopischen Bedingungen entwickelt. Auf Grundlage dieser Messmethodik erfolgten die Messungen des Hauptexperiments mit dem Ziel Referenzdaten von VA und HA für zwei Leuchtdichtebedingungen (photopische und skotopische), für zwei Kontrastpolaritäten (positive und negative) und für zwei Messdurchgänge (an zwei Messtagen) zu erheben.

##### **4.7.2 Lokale Methodik**

Insgesamt zehn Probanden (sechs erfahrene und vier unerfahrene Probanden) nahmen an dem Hauptexperiment teil. Jeder Proband wurde zweimal - an zwei verschiedenen Tagen - gemessen. Die maximale Leuchtdichte betrug unter photopischen beziehungsweise skotopischen Messbedingungen 218 cd/m<sup>2</sup> beziehungsweise 0,004 cd/m<sup>2</sup>. Als VA-Reiz wurde der Landolt-

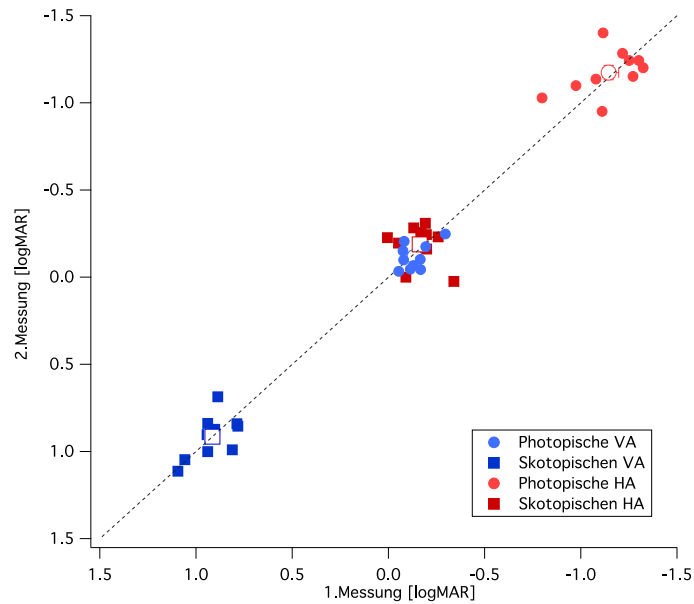
Ring mit positiver und negativer Kontrastpolarität verwendet (Bach 1996). Als HA-Reiz wurde der Drei-Balkenreiz (Livingstone und Hubel 1994) mit positiver und negativer Kontrasteinstellung verwendet. Unter photopischen und skotopischen Bedingungen fanden jeweils vier Messungen statt (2xVA und 2xHA). Es fanden keine Übungsdurchgänge statt. Die Messentfernung unter photopischen Bedingungen betrug 4 m und unter skotopischen Bedingungen 0,75 m. Für jede Kontrastpolarität wurden jeweils einmal VA und HA bestimmt (siehe *Tabelle 1*).

### **4.7.3 Ergebnisse**

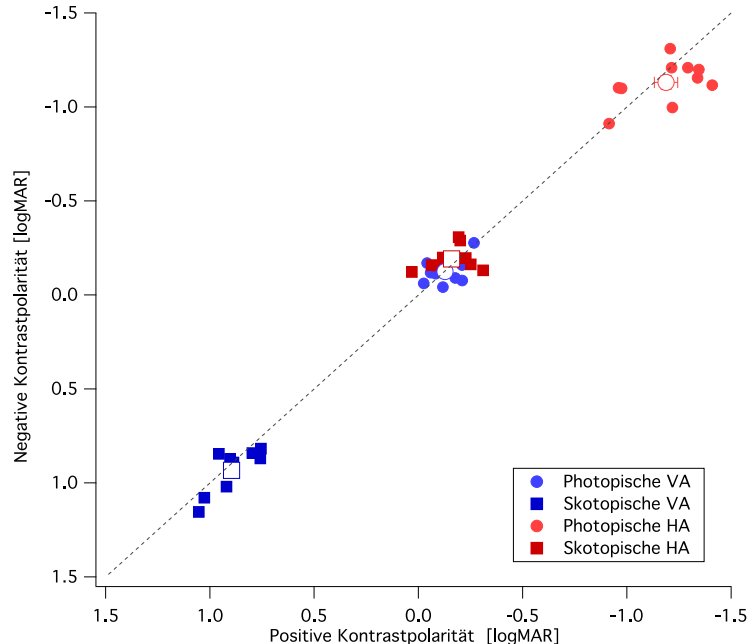
Folgende Einflussfaktoren der Sehschärfe wurden analysiert: (a) Einfluss des Messtags und der Kontrastpolarität auf die Sehschärfe. (b) Einfluss der Leuchtdichte auf die Sehschärfe. (c) Reproduzierbarkeit der Sehschärfebestimmung. Darüber hinaus wurde (d) das Verhältnis der photopischen VA zu den drei anderen Sehschärfebedingungen analysiert.

#### *4.7.3.1 Einfluss des Messtages und der Kontrastpolarität auf die Sehschärfe*

Um Einflussfaktoren der Sehschärfe zu identifizieren, wurden die Messwerte mit einer vier Faktor repeated-measure ANOVA analysiert. Die vier Faktoren waren der (1) Sehtest (VA und HA), die (2) Leuchtdichtebedingung (photopische und skotopische), die (3) Kontrastpolarität (positiv und negativ) und der (4) Messdurchgang (erster und zweiter Messtag). Der (1) Sehtest [ $F(1,9)=1424,199$   $P<0,001$ ] und die (2) Leuchtdichtebedingung [ $F(1,9)=964,093$ ;  $P<0,001$ ] zeigten sich als signifikante Einflussfaktoren. Die (3) Kontrastpolarität [ $F(1,9)=0,710$ ;  $P=0,421$ ] und die (4) Leuchtdichte [ $F(1,9)=0,183$ ;  $P=0,679$ ] zeigten sich als nicht signifikante Einflussfaktoren. Die weitere Analyse der signifikanten Einflussfaktoren erfolgte mit dem gepaarten t-Test: photopische HA ( $P_{0,017}<0,001$ ) und skotopische VA ( $P_{0,025}<0,001$ ) unterschieden sich signifikant von der photopischen VA. Photopische VA und skotopische HA unterschieden sich nicht signifikant voneinander ( $P=0,069$ ). Die Messwerte sind in *Tabelle 8* dargestellt. Bei graphischer Darstellung - durch Auftragen der Messwerte der beiden Kontrastpolaritäten (positive und negative Kontrastpolarität) beziehungsweise der beiden Messdurchgänge (erster und zweiter Messtag) gegeneinander - streuten die Messwerte gleichmäßig um die Winkelhalbierende (*Abbildungen 17 und 18*).



**Abbildung 17: Reproduzierbarkeit durch Vergleich der Sehschärfen der beiden Messtage miteinander.** In dem Graphen sind die Sehschärfen der beiden Messtage dargestellt. Die beiden Kontrastpolaritäten sind gemittelt (siehe *Einfluss des Messtages und der Kontrastpolarität auf die Sehschärfe*). Die Achsen sind invertiert, sodass die höchste Sehschärfe (photopische HA) rechts oben und die geringste Sehschärfe (skotopische VA) links unten liegen. Die vergrößerten Zeichen symbolisieren die Mittelwerte  $\pm$  des Standardmessfehlers (zum Teil kleiner als die Symbolgröße).

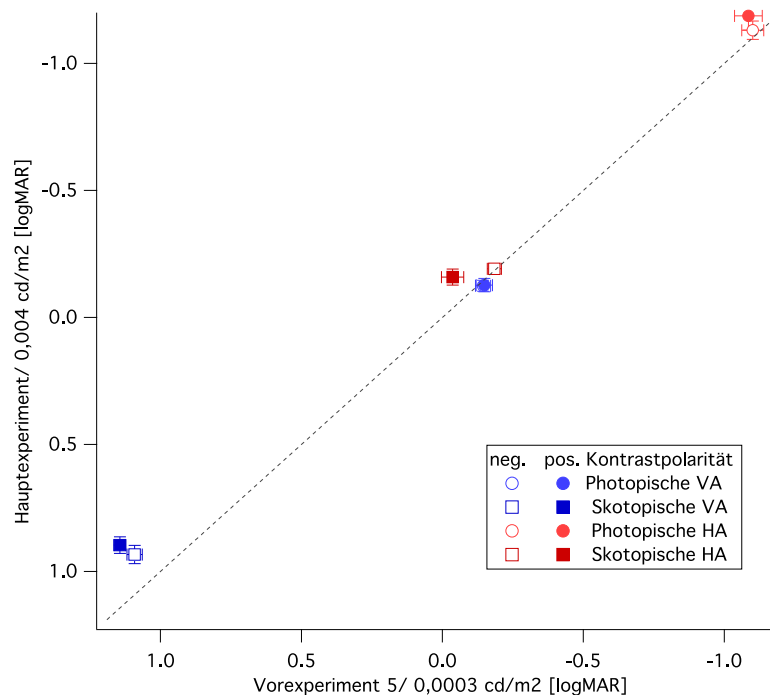


**Abbildung 18: Vergleich der Sehschärfen der beiden Kontrastpolaritäten miteinander.** In dem Graphen sind die Sehschärfen der beiden Kontrastpolaritäten gegeneinander aufgetragen. Eine Mittelung der beiden Messtage ist möglich (siehe *Einfluss des Messtages und der Kontrastpolarität auf die Sehschärfe*). Die Achsen sind invertiert, sodass die höchste Sehschärfe (photopische HA) rechts oben und die geringste Sehschärfe (skotopische VA) links unten liegen. Die vergrößerten Zeichen symbolisieren die Mittelwerte  $\pm$  des Standardmessfehlers (zum Teil kleiner als die Symbolgröße).



#### 4.7.3.2 Einfluss der Leuchtdichte auf die Sehschärfe

In diesem Absatz wird der Einfluss der Leuchtdichte auf die Sehschärfe untersucht. Hierzu wurden die Sehschärfen des Hauptexperiments ( $0,004 \text{ cd/m}^2$ ) und des Vorexperiments 5 ( $0,0003 \text{ cd/m}^2$ ) analysiert. Um Einflussfaktoren der Sehschärfe zu identifizieren, wurden die Messwerte mit einer vier Faktor repeated-measure ANOVA analysiert. Die vier Faktoren waren der (1) Sehtest (VA und HA), die (2) Leuchtdichtebedingung (photopische und skotopische), die (3) Kontrastpolarität (positiv und negativ) und die (4) Leuchtdichte ( $0,0003 \text{ cd/m}^2$  und  $0,004 \text{ cd/m}^2$ ). Der (1) Sehtest [ $F(1,9)=3663,919$   $P<0,001$ ] und die (2) Leuchtdichtebedingung [ $F(1,9)=2477,286$ ;  $P<0,001$ ] zeigten sich als signifikante Einflussfaktoren. Die (3) Kontrastpolarität [ $F(1,9)=0,166$ ;  $P=0,693$ ] und die (4) Leuchtdichte [ $F(1,9)=3,753$ ;  $P=0,085$ ] zeigten sich als nicht signifikante Einflussfaktoren. Bei graphischer Darstellung, durch Auftragen der Mittelwerte der beiden Experimente (Hauptexperiment und Vorexperiment 5) gegeneinander, lagen die Mittelwerte auf beziehungsweise über der Winkelhalbierenden (siehe *Abbildung 19*).



**Abbildung 19: Vergleich der Sehschärfen beider Experimente (Hauptexperiment und Vorexperiment 5) miteinander.** Die Achsen sind invertiert, sodass die höchste Sehschärfe (photopische HA) rechts oben und die geringste Sehschärfe (skotopische VA) links unten liegen. Die vergrößerten Zeichen symbolisieren die Mittelwerte  $\pm$  den Standardmessfehler (zum Teil kleiner als die Symbolgröße). Da die Sehschärfe der beiden Experimente an einem unterschiedlichen Probandenpool ermittelt wurde, sind die Mittelwerte angegeben. Die gefärbten Zeichen symbolisieren die Sehschärfe der positiven Kontrastpolaritäten, die nicht gefärbten Zeichen die Sehschärfe der negativen Kontrastpolaritäten.

#### 4.7.3.3 Reproduzierbarkeit der intraindividuellen Sehschärfebestimmung

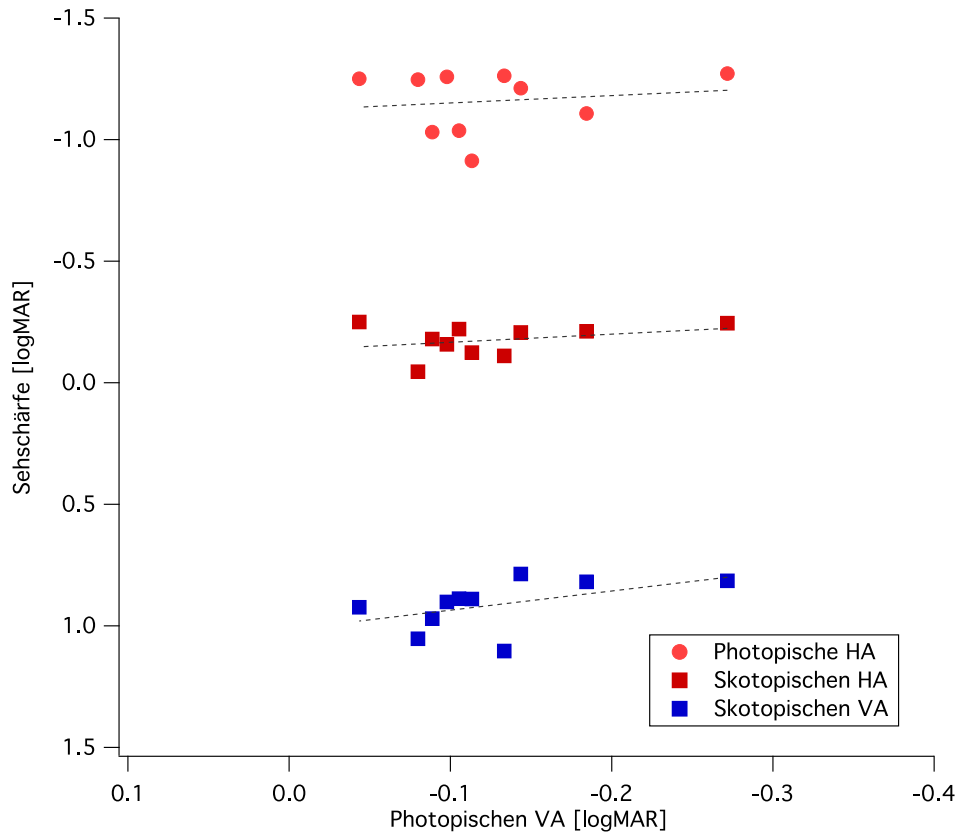
Um die Streuung und Reproduzierbarkeit der intraindividuellen Sehschärfebestimmung zu quantifizieren, wurde das Limits of Agreement (LOA) ermittelt (Martin Bland und Altman 1986) (siehe *Tabelle 8*). Wie im Abschnitt *Statistik* beschrieben, ist das LOA geeignet für den Vergleich zweier Methoden bzw. zweier Messdurchgänge miteinander. Das LOA der VA-Bestimmungen war geringer als das LOA der HA-Bestimmung, dies galt gleichermaßen für die photopischen und skotopischen Leuchtdichtebedingungen. Bei Ermittlung des LOAs aus den Sehschärfen der beiden Kontrastpolaritäten verringerte sich die Streuungsbreite: Für die photopische VA um den Faktor 0,7, für die photopische HA um den Faktor 0,5, für die skotopische VA um den Faktor 0,9 und für die skotopische HA um den Faktor 0,8. Folgende LOAs wurden durch Mittelung der Sehschärfen der beiden Kontrastpolaritäten ermittelt [logMAR]: Für die photopische VA-Bestimmung betrug das LOA  $\pm 0,15$ , für die photopische HA-Bestimmung  $\pm 0,30$ , für die skotopische VA-Bestimmung  $\pm 0,20$  und für die skotopische HA-Bestimmung  $\pm 0,33$ .

#### 4.7.3.4 Verhältnis der photopischen VA zu den anderen Sehschärfen

In diesem Absatz wird das Verhältnis der photopischen VA zu den drei anderen Sehschärfebedingungen ermittelt (siehe *Abbildung 19*). Im Vergleich zur photopischen VA betrug die photopische HA das 10,7fache, die skotopische HA das 1,1fache und die skotopische VA das 0,1fache (siehe *Tabelle 8*). Der Korrelationskoeffizient ( $r$ ) der photopischen HA betrug 0,152 ( $P=0,340$ ), der skotopischen HA 0,323 ( $P=0,181$ ) und der skotopischen VA 0,490. Die photopische und skotopische HA korrelierten nicht signifikant ( $P=0,181$ ) mit der VA. Die skotopische VA korrelierte nicht signifikant ( $P=0,075$ ) mit der photopischen VA. Die photopische und skotopische HA korrelierten nicht signifikant miteinander ( $P=0,480$ ).

Sehtest +Kontrastpolarität (KP)	logMAR	decVA	LOA (Limits of Agreement) in logMAR
Photopische VA (Positiver KP)	1,35	-0,13	±0,22
Photopische VA (Negativer KP)	1,32	-0,12	±0,21
Photopische VA (MW)	1,34	-0,13±0,02	±0,15
Photopische HA (Positiver KP)	15,14	-1,18	±0,59
Photopische HA (Negativer KP)	13,49	-1,13	±0,58
Photopische HA (MW)	14,43	-1,16 ±0,04	±0,30
Skotopische VA (Positiver KP)	0,13	0,90	±0,21
Skotopische VA (Negativer KP)	0,12	0,93	±0,25
Skotopische VA (MW)	0,12	0,91 ±0,03	±0,20
Skotopische HA (Positiver KP)	1,45	-0,16	±0,39
Skotopische HA (Negativer KP)	1,55	-0,19	±0,40
Skotopische HA (MW)	1,50	-0,18 ±0,02	±0,33

**Tabelle 8: Sehschärfen des Hauptexperiments.** Dargestellt sind die gemittelten Sehschärfen des ersten und zweiten Messtags. Die Sehschärfen sind in den Einheiten logMAR und decVA angegeben. Das LOA ist in der Einheit logMAR angegeben.



**Abbildung 19: Verhältnis der photopischen VA zu den anderen Sehschärfen.** Auftragen der gemittelten Sehschärfen (photopische VA, skotopische VA/HA) gegen die photopische VA. Die Achsen sind invertiert, sodass die höchste Sehschärfe (photopische HA) rechts oben und die geringste Sehschärfe (skotopische VA) links unten liegen.

#### 4.7.4 Lokale Diskussion

In diesem Absatz wird der Messdurchgang als Einflussfaktor der Sehschärfe diskutiert. Der Messdurchgang erwies sich nicht als signifikanter Einflussfaktor der Sehschärfe, hieraus lässt sich schließen, dass sich die Messwerte der beiden Messtage nicht signifikant voneinander unterscheiden. Es ließ sich kein Lerneffekt nachweisen. Möglicherweise war die Anzahl der Messdurchgänge und die Probandenanzahl nicht ausreichend, um statistisch signifikante Messwertzunahmen nachweisen zu können. Auf den *Seiten 64 f.* werden diese Ergebnisse mit Studien verglichen.

In diesem Absatz wird die Kontrastpolarität als Einflussfaktor der Sehschärfe diskutiert. Die Kontrastpolarität erwies sich nicht als signifikanter Einflussfaktor der Sehschärfe, hieraus lässt sich schließen, dass sich die Messwerte der beiden Kontrastpolaritäten nicht signifikant voneinander unterscheiden. Dieses Ergebnis stimmte mit dem des Vorexperiments 6, das unter einer vergleichbaren skotopischen Leuchtdichte durchgeführt wurde, überein, in dem sich

ebenfalls die Kontrastpolarität nicht als signifikanter Einflussfaktor der Sehschärfe zeigte. Dieses Ergebnis stimmte jedoch nicht mit dem des Vorexperiments 5, das unter einer etwa zehnfach geringeren skotopischen Leuchtdichte durchgeführt wurde, überein, in dem sich die Kontrastpolarität als signifikanter Einflussfaktor zeigte. Wie ich auf den *Seiten 53 und 65ff.* diskutierte, schien die skotopische Abbildungsqualität aufgrund der höheren Leuchtdichte in dem Hauptexperiment, im Vergleich zum Vorexperiment 5, besser zu sein, weshalb sich der positive Effekt der negativen Kontrastpolarität (der vor allem bei einer reduzierten Abbildungsqualität beschrieben wurde) nicht manifestierte.

In diesem Absatz wird das LOA der intraindividuellen Sehschärfebestimmungen beziehungsweise die Reproduzierbarkeit Sehschärfe mit einer Messmethode diskutiert. Für die photopischen intraindividuelle VA-Bestimmung wurde ein LOA von  $\pm 0,15$  logMAR ermittelt, dies entsprach einer Streuungsbreite von  $\pm 1,5$  Visusstufen (siehe *Tabelle 8*). Petersen (1990, 1993) beschrieb ebenfalls eine Streuungsbreite von  $\pm 1,5$  Visusstufen für die intraindividuelle photopische VA-Bestimmung. Da es für die anderen drei Sehschärfebestimmungen keine Referenzstudien gab, wurde diese Studie als Referenzstudie für die Qualität der Messwerte verwendet. Ein LOA der intraindividuellen photopischen HA-Bestimmung von  $\pm 0,30$  logMAR entsprach  $\pm 3$  Visusstufen. Ein LOA der intraindividuellen skotopischen VA-Bestimmung von  $\pm 0,20$  logMAR entsprach  $\pm 2$  Visusstufen. Ein LOA der intraindividuellen skotopischen HA-Bestimmung von  $\pm 0,33$  logMAR entsprach  $\pm 3$  Visusstufen. Eine Schwankungsbreite von  $\pm 1,5$  Visusstufen bedeutet beispielsweise, dass bei demselben Patienten in zwei hintereinander folgenden Messdurchgängen folgende Sehschärfen bestimmt wurden (1. Messdurchgang: 1,0 decVA und 2. Messdurchgang: 0,7 decVA). Noch ausgeprägter ist der Effekt bei einer Schwankungsbreite von  $\pm 3$  Visusstufen (1. Messdurchgang: 1,0 decVA und 2. Messdurchgang: 0,5 decVA). Aufgrund der großen intraindividuellen Schwankungsbreite erschien insbesondere die HA-Bestimmung mithilfe der Balkenreizmethode nicht geeignet für die klinische Anwendung. Weitere Studien erscheinen deshalb notwendig um Messmodifikationen (zum Beispiel ein anderer Sehreiz oder eine höhere Anzahl an Messungen je Messdurchgang) zu identifizieren, mit dem Ziel die intraindividuelle Streuungsbreite der Sehschärfewerte zu verringern.

In diesem Absatz wird der Einfluss der Leuchtdichte auf die Sehschärfe diskutiert. Die Leuchtdichte zeigte sich nicht als signifikanter Einflussfaktor, hieraus lässt sich schließen, dass

sich die Sehschärfen der zwei skotopischen Leuchtdichtebedingungen ( $0,0003 \text{ cd/m}^2$  und  $0,004 \text{ cd/m}^2$ ) nicht signifikant voneinander unterschieden.

In diesem Absatz wird das Verhalten der photopischen VA gegenüber den anderen Sehschärfen diskutiert. VA und HA korrelierten nicht signifikant miteinander. Ebenso zeigte sich keine Korrelation der Sehschärfen untereinander (bei Vergleich von photopischer und skotopischer Sehschärfebedingung). Das Fehlen einer signifikanten Interaktion der beiden Leuchtdichtebedingungen derselben Sehschärfe könnte an dem Versuchsdesign liegen, das nicht für die Untersuchung der Korrelation geeignet erschien aufgrund der geringen Probandenzahl und des eingeschränkten Sehschärfebereichs ( $VA \geq 1,0 \text{ decVA}$ ). Um mögliche Korrelationen zwischen den Sehschärfebedingungen zu untersuchen benötigte es ein Probandenkollektiv mit einem größeren Sehschärfespannweite.

In diesem Absatz werden die Verhältnisse der Sehschärfebedingungen zu der photopischen VA diskutiert. Das Verhältnis von photopischer und skotopischer VA betrug 10,7. Andere Studien beschrieben für vergleichbare photopische ( $155 \text{ cd/m}^2$ ) und skotopische ( $2,69 \times 10^{-3} \text{ cd/m}^2$ ) Leuchtdichtebedingungen ein höheres Verhältnis von 13. Es gab keine Referenzstudien zum Vergleich der Verhältnisse der anderen Sehschärfebedingungen zueinander. Die photopische HA unterschieden sich signifikant von der photopischen VA, dies erschien, aufgrund der unterschiedlichen Verarbeitungsmechanismen (siehe *Grundlagen*) der beiden Sehschärfen, plausibel. Dasselbe galt für die skotopische VA, bedenkt man, dass unter photopischen und skotopischen Bedingungen unterschiedliche Rezeptoren aktiviert sind. Die photopische VA und skotopische HA hatten denselben Sehschärfebereich, hieraus sollte jedoch nicht auf gleiche Verarbeitungsmechanismen geschlossen werden. Die Verhältnisse konnten als vereinfachte Faustformel betrachtet werden, um von einer der vier Sehschärfebedingungen auf die anderen drei Rückschlüsse zu ziehen. Bestimmte man beispielsweise bei einem Probanden eine photopische VA von  $1,0 \text{ decVA}$ , so müsste die skotopische VA etwa  $0,1 \text{ decVA}$ , die skotopische HA etwa  $1,0 \text{ decVA}$  und die photopische HA etwa  $10 \text{ decVA}$  betragen.

## 5 Diskussion

In dem Abschnitt *Diskussion* werden die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit zusammengefasst und dann auf ihre Plausibilität mit bisherigen Studien verglichen. Anschließend werden die Limitationen der Arbeit erörtert. Abschließend wird die Relevanz der Arbeit und mögliche Anwendungsbereiche diskutiert.

### 5.1 Kurze Zusammenfassung der zentralen Punkte

Die vorliegende Arbeit befasste sich mit den zwei Sehschärfen VA und HA. Die Arbeit ist thematisch in die Vorexperimente und das Hauptexperiment gegliedert. In den Vorexperimenten wurden Einflussfaktoren (Messentfernung, HA-Sehreiz, Kontrastpolarität, Messdurchgang, Leuchtdichtebedingung) der beiden Sehschärfen untersucht und aufgrund der Erkenntnisse eine Messmethodik entwickelt. Mithilfe der Messmethodik wurden im Hauptexperiment Referenzdaten der VA und HA für zwei Leuchtdichtebedingungen erhoben. Folgende Sehschärfen wurden bestimmt [Dezimalvisus ( $\log\text{MAR} \pm \text{SEM}$ )]: photopische VA: 1,34 ( $-0,13 \pm 0,02$ ), photopische HA: 14,43 ( $-1,16 \pm 0,04$ ), skotopische VA: 0,12 ( $0,91 \pm 0,03$ ) und skotopische HA: 1,5 ( $-0,18 \pm 0,02$ ). Es zeigte sich keine signifikante Korrelation der Sehschärfen zueinander ( $P \geq 0,075$ ). Die photopische HA betrug das 10,7-fache, die skotopische HA das 1,1-fache und die skotopische VA das 0,1-fache der photopischen VA.

### 5.2 Plausibilität der Ergebnisse

*Photopische VA.* Die photopische VA der vorliegenden Arbeit wurde im Mittel mit 1,3 decVA ( $-0,12 \log\text{MAR}$ ) bestimmt und stimmte mit den Literaturwerten überein (Lin et al. 2015; Bartholomew et al. 2016).

*Photopische HA.* Die photopische HA wurde in der vorliegenden Arbeit mit 2-8 arcsec (30-7,5 decVA) bestimmt und stimmte damit ebenfalls mit den Literaturwerten überein (Wilson 1986; Westheimer und P. McKee 1977; Crist et al. 1997; Fahle und Edelman 1993).

*Skotopische VA.* Es wurde eine skotopische VA (skotopische Leuchtdichte von  $4 \times 10^{-3} \text{ cd/m}^2$ ) von 0,12 decVA bestimmt, dieser Wert stimmt mit der Literatur überein. Bei vergleichbarer Leuchtdichte von  $2,69 \times 10^{-3} \text{ cd/m}^2$  wurde eine VA von 0,12 decVA bestimmt (König 1897; Hecht 1928; Roelofs and Zeeman 1919; Shlaer 1937). Bartholomew et al. (2016) bestimmten -

bei einer Leuchtdichte von  $0,001 \text{ cd/m}^2$  und positiver Kontrastpolarität - eine skotopische VA von  $0,06 \text{ decVA}$  ( $1,22 \text{ logMAR}$ ).

*Skotopische HA.* Es fanden sich nur wenige Referenzstudien. Livingstone und Hubel (1994) bestimmten bei einer Leuchtdichte von  $0,0008 \text{ cd/m}^2$  und bei einer 40-minütigen Dunkeladaptation eine HA von etwa  $100 \text{ arcsec}$  ( $0,6 \text{ decVA}$ /  $0,22 \text{ logMAR}$ ). Dies ist eine geringere HA ( $1,5 \text{ decVA}$ /  $-0,17 \text{ logMAR}$ ) als in der vorliegenden Arbeit unter denselben Messbedingungen ermittelt werden konnte. Folgende Faktoren könnten die unterschiedlichen Ergebnisse erklären: (a) Die Leuchtdichte: Die Leuchtdichte in der vorliegenden Arbeit war etwa fünffach höher ( $0,004 \text{ cd/m}^2$ ). (b) Die Anzahl der Probanden je Messreihe: Die HA des Hauptexperiments wurden an zehn Probanden ermittelt. Livingstone und Hubel (1994) bestimmten die HA an drei Probanden. (c) Alter: Die Sehschärfe nimmt mit steigendem Lebensjahren ab. Die Sehschärfen der vorliegenden Arbeit stammen von jungen Probanden mit einem mittleren Alter von 24 Jahren. Das Durchschnittsalter der Probanden der oben zitierten Arbeit wird nicht angegeben. (d) Anzahl der HA-Messdurchgänge: Die HA-Messung der vorliegenden Arbeit umfasste 42 Durchgänge, wohingegen die HA-Messung der oben zitierten Arbeit 15 Durchgänge umfasste.

*Fehlender Einfluss des Messdurchgangs auf die Sehschärfe.* Durch Bestimmung der Sehschärfe an zwei Messtagen – wie in dem Vorexperiment 5 und dem Hauptexperiment durchgeführt - konnte eine Aussage über den Einfluss des Messdurchgangs auf die Sehschärfe getroffen werden. In den Experimenten fand sich keine signifikante Beeinflussung der Sehschärfe durch den Messdurchgang. Aus diesen Ergebnissen ließ sich schließen, dass für VA- und HA-Bestimmungen keine Übungsdurchgänge notwendig waren beziehungsweise, dass keine Lerneffekte auftraten. Diese Beobachtungen standen im scheinbaren Widerspruch unter anderem zu den Studien von Fahle et al. (1995), Fendick und Westheimer (1983), Mckee und Westheimer (1978) und Fahle und Edelman (1993), die eine Beeinflussung der photopischen HA durch den Messdurchgang beziehungsweise Lerneffekte der photopischen HA beschrieben. Auch für die photopische VA wurden Lerneffekte beschrieben (Heinrich, Krüger, and Bach 2011). In den zitierten Arbeiten zeigte sich eine signifikante Sehschärfen-Zunahme allerdings erst nach hunderten Messungen (*Anmerkung: nicht Messdurchgängen*). In der vorliegenden Arbeit wurde die VA und HA mit einer deutlich geringeren Anzahl an Messungen (42 für die HA und 18 für die VA) bestimmt. Zukünftige Studien sind notwendig um den Einfluss des Messdurchgangs auf die Sehschärfe insbesondere unter skotopischen



Leuchtdichtebedingungen zu untersuchen. Hierfür ist ein Studiendesign mit einer höheren Anzahl an Messungen zu wählen.

*Einfluss der Kontrastpolarität auf die Sehschärfe.* Durch Bestimmung der Sehschärfe für zwei Kontrastpolaritäten – wie in den Vorexperimenten 5 und 6 sowie dem Hauptexperiment durchgeführt – konnte eine Aussage über den Einfluss der Kontrastpolarität auf die Sehschärfe getroffen werden. In dem Hauptexperiment fand sich keine signifikante Beeinflussung der Sehschärfe durch die Kontrastpolarität.

Die Kontrastpolarität beeinflusst das Sehen, so erscheinen zum Beispiel ein heller Gegenstand auf dunklem Hintergrund größer, als ein dunkler Gegenstand auf einem hellen Hintergrund (Cordingley and Fletcher 1961; Weale 1975). Die beiden Kontrastpolaritäten unterliegen unterschiedlichen Verarbeitungsmechanismen, weshalb unterschiedliche Messwerte vorhersehbar wären. In der Literatur sind zwei Neuronengruppen in dem Corpus geniculatum laterale beschrieben, die entweder durch einen schwarzen oder einen weißen Sehreiz aktiviert werden. Es ist beschrieben, dass die beiden Kontrastpolaritäten auf getrennten Wegen voneinander und von einem sich unterscheidendem ON- und OFF-Neuronenverhältnissen verarbeitet werden (Zemon, Gordon, and Welch 1988; Shechter and Hochstein 1990). In der Literatur ist ein Einfluss zwischen VA und Kontrastpolarität beschrieben. Piepenbrock et al. (2013) beschrieben eine höhere photopische VA der positiven Kontrastpolaritätsreize für alle Altersstufen. Stoimenova verglich die Kontrastpolaritätsschwelle von Emmetropen und Myopen. Hierbei zeigte sich bei Emmetropen eine signifikant höhere Schwelle der positiven Kontrastpolarität, bei Myopen zeigte sich hingegen eine signifikant höhere Schwelle der negativen Kontrastpolarität. Der Einfluss nahm mit zunehmender Leuchtdichte ab (Stoimenova 2007). Westheimer beschrieb einen positiven Einfluss der negativen Kontrastpolarität auf die photopische VA insbesondere für ältere Patientengruppen, bei den jungen Probanden zeigte sich kein Unterschied der beiden Kontrastpolaritäten (2003; 2003). Dies stimmt mit den Erkenntnissen der vorliegenden Arbeit überein, in der sich bei den jungen Probanden kein Einfluss der Kontrastpolarität nachweisen ließ. Die negative Kontrastpolarität hat insbesondere bei Medientrübung einen positiven Einfluss auf die VA (Wesemann 1985). Da die Messungen an gesunden, jungen Probanden ohne ophthalmologische Vorerkrankungen durchgeführt wurden, ließ sich kein Einfluss von Kontrastpolarität und Sehschärfe nachweisen. Zukünftige Studien, die sich mit der Fragestellung des Einflusses der Kontrastpolarität auf die Sehschärfe

beschäftigen, sollten ein breiteres Probandenkollektiv (unter anderem ältere Probanden und Probanden mit ophthalmologischen Vorerkrankungen) wählen.

### 5.3 Limitationen der Arbeit

In diesem Abschnitt werden mögliche Problemquellen im Versuchsaufbau beschrieben. Die vorliegende Arbeit war die erste, die die vier Sehschärfebedingungen miteinander verglich. Daher konnten bei der Versuchsplanung nur auf die Erkenntnisse weniger Studien zurückgegriffen werden.

Insbesondere die Messungen unter skotopischen Bedingungen sind mit einigen methodischen Herausforderungen behaftet: (a) *Reizpräsentation*. Die Bilddarstellung erfolgte in den Vorexperimenten unter skotopischen Bedingungen mithilfe von Filterfolien, die keine absolut plane Oberfläche besaßen. Diese Unebenheit bedingte eine leicht verzerrte Darstellung und somit verminderte Abbildungsqualität. Für das Hauptexperiment wurden Kamerafilter - mit planer Oberfläche – verwendet, hierunter war die Abbildungsqualität verbessert, jedoch das Sichtfenster verkleinert. (b) *Fixationsschwierigkeiten*. Unter skotopischen Bedingungen ist eine periphere Fixation, im Gegensatz zur zentralen Fixation unter alltäglichen photopischen Bedingungen, notwendig. Diese bereitete, da ungewohnt, den Probanden Schwierigkeiten. Es bestand die Möglichkeit zum Beispiel mithilfe eines roten Lichts einen Fixationspunkt zu bilden, der die Aufgabenstellung möglicherweise vereinfacht hätte. Auf einen derartigen Fixationspunkt wurde aus zweierlei Gründen verzichtet. Einerseits stellt ein solches Licht insbesondere für HA-Messungen, bei denen die relative Position mindestens zweier Reize zueinander ermittelt wird, einen weiteren Vergleichspunkt dar. Andererseits müsste das Licht, um gesehen zu werden, eine höhere Leuchtdichte als der Bildschirm besitzen. Diese höhere Leuchtdichte könnte die Sehschärfe beeinflussen. (c) *Ermüdungseffekte*. Um bei skotopischen Messungen vorhersehbare Ermüdungseffekte zu vermeiden, wurde die Anzahl der Messdurchgänge verringert. Kompensatorisch wurde die Probandenzahl erhöht. (d) *Versuchsdesign*. In der Arbeit wurden viele Einflussfaktoren der Sehschärfe untersucht. Um diese vielen Einflussfaktoren untersuchen zu können, musste das Studiendesign verallgemeinert werden. Das Fokussieren auf eine geringere Anzahl an Einflussfaktoren und die genaue Anpassung des Studiendesigns an die Fragestellung, könnte zu eindeutigeren – statistisch signifikanten - Ergebnissen führen. Beispielsweise sollte die Fragestellung nach der Korrelation der vier Sehschärfebedingungen zueinander an einer größeren Probandenanzahl mit einer größeren Sehschärfenbreite erhoben werden.

## 5.4 Relevanz der Arbeit im Rahmen der Sehforschung und der klinischen Anwendung

In der vorliegenden Arbeit wurde eine Messmethode zur Bestimmung von VA und HA insbesondere unter skotopischen Bedingungen basierend auf dem FrACT (Bach 1996) entwickelt und getestet. Folgende methodische Empfehlungen lassen sich aus den Experimenten ableiten:

- Zur Bestimmung der Übersehschärfe ist die Drei-Balkenreizmethode der Zwei-Balkenreizmethode sowohl unter photopischen als auch skotopischen Leuchtdichtebedingungen vorzuziehen, da hierunter die Streubreite geringer und die Reizorientierung einfacher zu erkennen ist.
- Für skotopische Sehschärfemessungen ist eine maximale skotopische Leuchtdichte von  $0,004 \text{ cd/m}^2$  zu empfehlen, da hierunter die Abbildungsqualität höher, im Vergleich zu niedrigeren skotopischen Leuchtdichtebedingungen, ist.
- Eine Dunkeladaptation von 40 Minuten ist ausreichend für Sehschärfemessungen unter einer maximalen skotopischen Leuchtdichte von  $0,004 \text{ cd/m}^2$ .
- Unter den in der Studie gewählten Bedingungen sind keine Übungsdurchgänge notwendig, das heißt die Sehschärfen des ersten Messdurchgangs unterscheiden sich nicht signifikant von denen der zweiten.
- Die negative Kontrastpolarität ist der positiven bei der Sehschärfebestimmung unter skotopischen Bedingungen vorzuziehen, da hierunter das Erkennen des Sehreizes bei reduzierter Abbildungsqualität höher ist.
- Bei einer photopischen Messentfernung von 4 m und einer skotopischen Messentfernung von 0,75 m sind bei einem Monitor mit einer Auflösung von  $1280 \times 1024$  Pixeln keine Auflösungsgrenzeffekte beobachtbar.

Obwohl die Übersehschärfe in der Klinik und Forschung nicht so geläufig ist, findet sie in vielerlei Bereichen Anwendungsmöglichkeiten. HA-Messungen werden in der neurophysiologischen Grundlagenforschung an Gesunden angewandt, zum Beispiel um die Entwicklung des menschlichen visuellen Systems im Laufe des Lebens zu erforschen. Mithilfe

von Messungen der VA und HA können die Entwicklungsprozesse des Auges sowie der nachgeschalteten kortikalen Areale untersucht werden. Während die VA im Alter von etwa 5 Jahren vollständig ausgebildet ist, ist dies die HA erst im Alter von 21 Jahren (Wang et al. 2009).

Auch in der Früherkennung der altersbedingten Makuladegeneration zeigten HA-Teste (die sogenannte „preferential-hyperacuity-perimetry“ (PHP)) mindestens ein gleichwertiges Ergebnis im Hinblick auf die Früherkennung von Metamorphopsien (eines Symptoms, dessen Ursache oftmals ein Makulaödem ist, das in der Frühphase behandelt werden kann und sollte), im Vergleich zum klinischen Standardscreeningtest, dem Amsler-Gitter (Kampmeier et al. 2006; Loewenstein et al. 2003; Faes et al. 2014; Querques et al. 2011).

HA-Messungen kommen ebenfalls bei der Grundlagenforschung von Erkrankungen zum Einsatz. Im Auge existieren - mit den Zapfen und Stäbchen - zwei Sehsysteme. Erkenntnisse über die Kompensation durch das eine System bei Ausfall des anderen erhofft man sich von Messungen der HA ebenso wie Aussagen über die Beziehung beider Systeme zueinander. So untersucht zum Beispiel eine aktuelle Studie, teilweise basierend auf den Erkenntnissen der vorliegenden Arbeit, unter anderem an der Augenklinik der Universität Magdeburg Patienten mit Achromatopsie. Diese Erkrankung ist gekennzeichnet durch eine Funktionsstörung der Zapfen einhergehend mit geringer VA und Photophobie (Aboshiha et al. 2014). Mithilfe von skotopischen HA-Bestimmungen soll der Einfluss dieser Zapfenpathologie auf das Sehsystem und die kortikale Plastizität untersucht werden (Herbik and Hoffmann).

## 6 Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit beschäftigte sich mit zwei Sehschärfen: der konventionellen Sehschärfe (VA), die das Auflösungsvermögen des Abstands zweier Punkte zueinander angibt und der Übersehschärfe (HA), die das Auflösungsvermögen der relativen Position mindestens zweier Objekte zueinander angibt. Die kortikalen Verarbeitungsmuster der HA prädisponieren diese für die Grundlagenforschung des menschlichen Sehsystems sowie einiger Krankheitsbilder. Für diese Studien sind jedoch noch Erkenntnisse bezüglich der reproduzierbaren Bestimmung der HA notwendig. Diese sollten im Rahmen der vorliegenden Arbeit generiert werden. In dem ersten Teil der Arbeit, den sechs Vorexperimenten, wurden Einflussfaktoren (unterschiedlicher HA-Sehreize, unterschiedliche skotopische Leuchtdichtebedingungen, unterschiedliche skotopische Messentfernungen und unterschiedliche Kontrastpolaritäten) auf die VA und HA untersucht. Mithilfe dieser Erkenntnisse wurde eine Messmethode zur Bestimmung der VA und insbesondere der HA unter photopischen und insbesondere skotopischen Leuchtdichtebedingungen entwickelt.

In dem zweiten Teil der Arbeit, dem Hauptexperiment, wurden Referenzwerte für die VA und HA unter photopischer (p) (maximale Leuchtdichte:  $220 \text{ cd/m}^2$  und 4 m Entfernung) und skotopischer (s) Leuchtdichtebedingung (maximale Leuchtdichte:  $0,004 \text{ cd/m}^2$  und 0,75 m Entfernung) an zehn jungen Normalprobanden erhoben. Erstmals wurden die vier Sehschärfebedingungen miteinander verglichen. Die Sehschärfebestimmung erfolgte für zwei unterschiedliche Kontrastpolaritäten (positive und negative) und wurde an einem weiteren Messtag wiederholt. Unter oben beschriebenen Messbedingungen ließ sich keine Beeinflussung der Sehschärfe durch die Kontrastpolarität oder den Messtag nachweisen. Die vier Sehschärfebedingungen (pVA, pHA, sVA und sHA) korrelierten nicht signifikant miteinander ( $P \geq 0,075$ ). Die pVA betrug  $1,34 \text{ decVA}$  ( $-0,13 \text{ logMAR}$ ), die pHA betrug  $14,43 \text{ decVA}$  ( $-1,16 \text{ logMAR}$ ) und damit das 10,7-fache der pVA, die sVA betrug  $0,12 \text{ decVA}$  ( $0,91 \text{ logMAR}$ ) und damit das 0,1-fache der pVA und die sHA betrug  $1,50 \text{ decVA}$  ( $-0,18 \text{ logMAR}$ ) und damit das 1,1-fache der pVA. Um eine Aussage über die Reproduzierbarkeit der Sehschärfe mithilfe der jeweiligen Messmethode zu machen, wurde das „Limits of Agreement“ (LOA) bestimmt. Je geringer dieses ist, desto höher ist die Reproduzierbarkeit der Methode zu betrachten. Das LOA der VA- beziehungsweise HA-Bestimmung betrug  $\pm 0,20 \text{ logMAR}$  (entspricht  $\pm 2$  Visusstufen) beziehungsweise  $\pm 0,30 \text{ logMAR}$  (entspricht  $\pm 3$  Visusstufen). Die Erkenntnisse der Arbeit dienen als Grundlage zukünftiger Studien auf dem Gebiet der Sinnesphysiologie.

## 7 Literaturverzeichnis

1. Aboshiha, J., Luong, V., Cowing, J., Dubis, A.M., Bainbridge, J.W., Ali, R.R. et al.: Dark-Adaptation Functions in Molecularly Confirmed Achromatopsia and the Implications for Assessment in Retinal Therapy Trials. In: *Investigative Ophthalmology & Visual Science*. 55. 6340–6349 (2014).
2. Applegate, R.A.: Limit to Vision: Can We Do Better Than Nature? In: *Journal of Refractive Surgery*. 16. 547-51 (2000).
3. Augustin, A.J.: *Augenheilkunde*. pp 1207-1228. Springer. Berlin 2007.
4. Bach, M.: The Freiburg Visual Acuity Test- Automatic Measurement of Visual Acuity. In: *Optometry and Vision Science*. 73. 49–53 (1996).
5. Bach, M.: The Freiburg Visual Acuity Test-Variability Unchanged by Post-hoc Re-analysis. In: *Graefe's Archive for Clinical and Experimental Ophthalmology*. 245. 965–971 (2007).
6. Bach, M.: Manual of the Freiburg Vision Test 'FrACT', Version 3.9.8 (2016).
7. Bach, M.; Kommerell, G.: Sehschärfebestimmung nach Europäischer Norm. Wissenschaftliche Grundlagen und Möglichkeiten der automatischen Messung. In: *Klinische Monatsblätter für Augenheilkunde*. 212. 190–195 (1998).
8. Bartholomew, A.J.; Lad, E.M.; Cao, D.; Bach, M.; Cirulli, E.T.: Individual Differences in Scotopic Visual Acuity and Contrast Sensitivity: Genetic and Non-Genetic Influences. In: *PloS one*. 11. (2016).
9. Barton, B.; Brewer, A.A.: Visual Field Map Clusters in High-Order Visual Processing: Organization of V3A/V3B and a New Cloverleaf Cluster in the Posterior Superior Temporal Sulcus. In: *Frontiers in Integrative Neuroscience*. 11. (2017).
10. Beck, J.; Schwartz, T.: Venier Acuity with Dot Test Objects. In: *Vision Research*. 19. 313–319 (1979).
11. Birch, E.E.; Swanson, W.H.: Hyperacuity Deficits in Anisometric and Strabismic Amblyopes with Known Ages of Onset. In: *Vision Research*. 40. 1035–1040 (2000).
12. Bland, J.M.; Altman, D.G.: Measuring Agreement in Method Comparison Studies. In: *Stat Methods med res*. 8. 135–160 (1999).
13. Bondarko, V.M.; Danilova, M.V.: What Spatial Frequency Do We Use to Detect the Orientation of a Landolt C? In: *Vision Research*. 37. 2153–2156 (1997).
14. Brown, G.C.; Brown, M.M.; Sharma, S.; Stein, J.D.; Roth, Z.; Joseph C.; Beauchamp, G.R.: The Burden of Age-Related Macular Degeneration: A Value-Based Medicine Analysis. In: *Transactions of the American Ophthalmological Society*. 103. 173-84 (2005).
15. Chen, J.; Cranton, W.; Fihn, M.: *Handbook of Visual Display Technology*. pp. 5-20. Springer. Heidelberg, New York 2012.
16. Crist, E.; Mitesh, K.; Kapadia, G.; Westheimer, G.; Gilbert, C.D.: Perceptual Learning of Spatial Localization: Specificity for Orientation, Position, and Context. In: *Journal of Neurophysiology*. 78. 2889–94 (1997).
17. Cordingley, R.A.; Fletcher, B.: *History of Architecture on the Comparative Method*. The Athlone Press. London 1961.
18. Deutsche Ophthalmologische Gesellschaft e.V.: Leitlinie Nr. 7 Versorgung von Sehbehinderten und Blinden.doc (2011).
19. Duncan, R.O.; Boynton, G.M.: Cortical Magnification within Human Primary Visual Cortex Correlates with Acuity Thresholds. In: *Neuron*. 38. 659–671 (2003).

20. Faes, L.; Bodmer N.S.; Bachmann L.M.; Thiel M.A.; und Schmid M.K.: Diagnostic Accuracy of the Amsler Grid and the Preferential Hyperacuity Perimetry in the Screening of Patients with Age-Related Macular Degeneration: Systematic Review and Meta-Analysis. In: *Eye*. 28. 788–96 (2014).
21. Fahle, M.; Edelman, S.: Long-Term Learning in Vernier Acuity: Effects of Stimulus Orientation, Range and of Feedback. In: *Vision Research*. 33. 397–412 (1993).
22. Fahle, M.; Edelman, S.; Poggio, T.: Fast Perceptual Learning in Hyperacuity. In: *Vision Research*. 35. 3003–3013 (1995).
23. Feigl, B.; Brown, B.; Lovie-Kitchin, J.; Swann, P.: The Rod-Mediated Multifocal Electroretinogram in Aging and in Early Age-Related Maculopathy. In: *Current Eye Research*. 31. 635–644 (2006).
24. Fendick, M.; Westheimer, G.: Effects of Practice and the Separation of Test Targets on Foveal and Peripheral Stereoacuity. In: *Vision Research*. 23. 145–154 (1983).
25. Gaus, W.; Muche, R.: *Medizinische Statistik. Angewandte Biometrie für Ärzte und Gesundheitsberufe*. pp 270-370. Schattauer. Stuttgart 2014.
26. Goldstein, M.; Loewenstein, A.; Barak, A.; Pollack, A.; Bukelman, A.; Katz, H. et al.: Results of a Multicenter Clinical Trial to Evaluate the Preferential Hyperacuity Perimeter for Detection of Age-Related Macular Degeneration. In: *Retina*. 25. 296–303 (2005).
27. Graf, M.: Strategien der Visusbestimmung. In: *Klinische Monatsblätter für Augenheilkunde*. 221. 557–565 (2004).
28. Grehn, F.; Leydhecker, W. (1995): *Augenheilkunde*. pp 1-13. Springer. Berlin 1995.
29. Harms, V.: *Medizinische Statistik*. pp 24-48, pp 144-148, pp 186-192. Harms. Lindau 2012.
30. Hecht, S.: The Dark Adaption of the Human Eye. In: *The Journal of General Physiology*. 2. 499–517 (1920).
31. Hecht, S.: The Relation between Visual Acuity and Illumination. In: *The Journal of General Physiology*. 11. 255–81 (1928).
32. Heinrich, S. P.; Krüger, K.; Bach, M.: The Dynamics of Practice Effects in an Optotype Acuity Task. In: *Graefes Archive for Clinical and Experimental Ophthalmology*. 249. 1319–1326 (2011).
33. Herbig, A.; Hoffmann, M.B.: Achromatopsie: Untersuchungen zu Ausprägung und Plastizität des Sehens ohne Zapfenfunktion. Webseite: <https://forschung-sachsen-anhalt.de/project/achromatopsie-untersuchungen-auspraegung-21189>. Abgerufen 2019.
34. Herzog, M.; Fahle, M.: The Role of Feedback in Learning Discrimination Task. In: *Vision Research*. 37. 2133–2141 (1997).
35. Holm, S.: A Simple Sequentially Rejective Multiple Test Procedure. In: *Scandinavian Journal of Statistics*. 6. 65–70 (1979).
36. Janczyk, M.; Roland P.: *Inferenzstatistik Verstehen: Von A wie Signifikanztest bis Z wie Konfidenzintervall*. pp 121–38. Springer. Berlin, Heidelberg 1979.
37. Jackson, G.R.; Edwards, J.G.: A Short-Duration Dark Adaptation Protocol for Assessment of Age-Related Maculopathy. In: *Journal of Ocular Biology, Diseases and Informatics*. 1. 7–11 (2008).
38. Kellner, U.: *Retina*. pp. 9-18. Thieme. Stuttgart 2008.
39. Kampmeier, J.M.; Zorn, G.K.; Lang, Y.T.; Botros H.; Lang G.E.: Vergleich des Preferential-Hyperacuity-Perimeter (PHP)-Tests mit dem Amsler-Netz-Test bei der Diagnose verschiedener Stadien der altersbezogenen Makuladegeneration. In: *Klinische Monatsblätter für Augenheilkunde*. 223. 752–56 (2006).

40. Kiorpes, L.; Kiper, D.C.; Movshon, J.A.: Contrast Sensitivity and Vernier Acuity in Amblyopic Monkeys. In: *Vision Research*. 33. 2301–2311 (1993).
41. Knauer, C.; Pfeiffer, N.: Erblindung in Deutschland: Heute und 2030. In: *Der Ophthalmologe*. 103. 735–741 (2006).
42. Kreutzer, J.S.; DeLuca, J.; Caplan, B. (2011): *Encyclopedia of Clinical Neuropsychology*. Springer. New York, London 2011.
43. König, A.: Die Abhängigkeit der Sehschärfe von der Beleuchtungsintensität. In: *Akad. Wiss., Physik.-Math. Kl. (1897)*.
44. Kramer, F.: Sehschärfe- und Übersehschärfebestimmung: Vergleich photopischer und tiefskotopischer Bedingungen. pp 29-46. Bachelorarbeit an der Otto-von-Guericke Universität Magdeburg. Magdeburg 2018.
45. Lang, F.; Lang, P.: *Basiswissen Physiologie*. pp 66-77. Springer. Heidelberg 2007.
46. Levenson, J.H.; Alan, K.: *Clinical Methods: The History, Physical, and Laboratory Examinations*. Kapitel 111. Butterworths. Boston 1990.
47. Levi, D.; Klein, S.: Hyperacuity and Amblyopia. In: *Nature*. 298. 268–270 (1982).
48. Lin, R.J.; Jason S.; Nguyen, A.L.: Determinants and standardization of mesopic visual acuity. In: *Optometry and Vision Science: Official Publication of the American Academy of Optometry*. 92. 559–565 (2015).
49. Livingstone, M.S.; Hubel, D.H.: Stereopsis and positional acuity under dark adaptation. In: *Vision Research*. 34. 799–802 (1994).
50. Loewenstein, A.R.; Goldstein, M.; Leibovitch, I.; Barak, A.; Baruch, E.; Alster, Y.; Rafaeli, O.; Avni, I.; Yassur, Y.: Replacing the Amsler Grid: A New Method for Monitoring Patients with Age-Related Macular Degeneration. In: *Ophthalmology*. 110. 966–70 (2003).
51. Martin B.J.; Altman, D.G.: Statistical Methods for Assessing Agreement Between Two Methods of Clinical. In: *The Lancet*. 327. 307–310 (1986).
52. Mckee, S.P.; Westheimer, G.: Improvement in Vernier Acuity with Practice. In: *Perception & Psychophysics*. 24. 258–262 (1978).
53. McCulloch, D.L.; Marmor, M.F.; Brigell, M.G.; Hamilton, R.; Holder, G.E.; Tzekov, R.; Bach, M.: ISCEV Standard for Full-Field Clinical Electroretinography. In: *Documenta Ophthalmologica*. 130. 1–12 (2015).
54. Muranyi, D.; Hoffmann M.B.: Untersuchung des Skotopischen Sehens mit Multifokalen Visuell Evozierten Potentialen (mfVEP). In: *Der Ophthalmologe*. 113. 13–19 (2016).
55. Owsley, C.; Huisingh, C.; Jackson, G.R.; Curcio, C.A.; Szalai, A.J.; Dashti, N. et al.: Associations between Abnormal Rod-Mediated Dark Adaptation and Health and Functioning in Older Adults with Normal Macular Health. In: *Investigative Ophthalmology & Visual Science*. 55. 4776–4789 (2014).
56. Paul, H.: *Lexikon der Optik*. Kapitel Optik. Spektrum. Heidelberg 2003.
57. Petersen, J.: Zur Fehlerbreite der subjektiven Visusmessung. In: *Der Ophthalmologe*. 87. 604–608 (1990).
58. Petersen, J.: Fehlerhafte Visusbestimmung und ihre quantitativen Auswirkungen. In: *Der Ophthalmologe*. 90. 533–538 (1993)
59. Piepenbrock, C.; Mayr, S.; Mund, I.; Buchner, A.: Positive Display Polarity is Advantageous for Both Younger and Older Adults. In: *Ergonomics*. 56. 1116–1124 (2013).
60. Pocock, G.; Richards, C.D.: *Human physiology*. pp 185-232. Oxford University. Oxford 2006.



61. Poggio, T.: A Theory of How the Brain Might Work. In: *Cold Spring Harbor Symposia on Quantitative Biology*. 55. 899–910 (1990).
62. Poggio, T.; Fahle, M.; Edelman, S.: Fast Perceptual Learning in Visual Hyperacuity. In: *C.B.I.P. Paper*. 68. 1018-1021 (1991).
63. Poggio, T.; Edelman, S.; Fahle, M.: Learning of Visual Modules from Examples. A Framework for Understanding Adaptive Visual Performance. In: *CVGIP: Image Understanding*. 56. 22–30 (1992).
64. Querques, G.; Berboucha E.; Leveziel, N.; Pece, A.; und Souied E.H.: Preferential Hyperacuity Perimeter in Assessing Responsiveness to Ranibizumab Therapy for Exudative Age-Related Macular Degeneration. In *British Journal of Ophthalmology*. 95. 986–91 (2011).
65. Rüping, J.; Fetzner, U.: *Facts Augenheilkunde*. pp 1-3. KVM- Der Medizinverlag. Marburg 2011.
66. Roelofs, C.O.; Zeeman, W.P.: Die Sehschärfe im Halbdunkeln, zugleich ein Beitrag zur Kenntnis der Nachtblindheit. In: *Albrecht von Graefes Archiv für Ophthalmologie*. 99. 174–94 (1919).
67. Schmidt, R.F.: *Physiologie des Menschen*. pp 345-375. Springer. Heidelberg 2007.
68. Schwarzkopf, D.S.; Rees, G.: Subjective Size Perception Depends on Central Visual Cortical Magnification in Human V1. In: *PLoS One*. 8. e60550 (2013).
69. Siegel, A.; Saprú, H.N.: *Essential Neuroscience*. pp 292-318. Lippincott Williams & Wilkins. Philadelphia 2006.
70. Shapiro, S.S.; Wilk, M.B.: An Analysis of Variance Test for Normality. In: *Biometrika*. 52. 591–611 (1965).
71. Shechter, S.; Hochstein, S.: On and Off Pathway Contributions to Apparent Motion Perception. In: *Vision Research*. 30. 1189–1204 (1990).
72. Shlaer, S.: The Relation between Visual Acuity and Illumination. In: *The Journal of General Physiology*. 21. 165–88 (1937).
73. Stoimenova, B.D.: The Effect of Myopia on Contrast Thresholds. In: *Investigative Ophthalmology & Visual Science*. 48. 2371–74 (2007).
74. Speckmann, E.-J.; Hescheler, J.; Köhling, R.; Alzheimer, C.: *Physiologie*. pp 55-160. Elsevier Urban & Fischer. München 2013.
75. Timischl, W.: *Angewandte Statistik: Eine Einführung für Biologen und Mediziner*. pp 283-418. Springer. Wien, Heidelberg, Dordrecht, London, New York 2013.
76. Trampisch, H.J.; Ehle, B.: *Medizinische Statistik*. pp 210-263. Springer. Berlin 2000.
77. Wang, Y.-Z.; Morale, S.E.; Cousins, R.; Birch, E.E.: Course of Development of Global Hyperacuity over Lifespan. In: *Optometry and Vision Science: Official Publication of the American Academy of Optometry*. 86. 695–700 (2009).
78. Waugh, S.J.; Levi, D.M.: Visibility, Luminance and Vernier Acuity. In: *Vision Research*. 33. 527–538 (1993).
79. Weale, R.A.: Apparent Size and Contrast. In: *Vision Research*. 15. 949-953 (1975).
80. Wesemann, W.; Schiefer, U.; Bach, M.: Neue DIN-Normen zur Sehschärfebestimmung. In: *Der Ophthalmologe*. 107. 821–826 (2010).
81. Wesemann, W.: Zur Funktionsprüfung der zentralen Retina bei Trübungen des menschlichen Auges. pp 22-35. Dissertation an der Universität Hamburg. Hamburg 1983.
82. Wesemann, W.: Optotypensehschärfe bei Medientrübung. In: *Fortschritte der Ophthalmologie*. 82. 395–397 (1985).

83. Wesemann, W.: Sehschärfebestimmung mit Freiburger Visustest, Bailey-Lovie-Tafel und Landoltring-Tafel. In: *Klinische Monatsblätter für Augenheilkunde*. 219. 660–667 (2002).
84. Westheimer, G.: Visual Acuity and Hyperacuity. In: *Investigative Ophthalmology & Visual Science*. 14. 570–573 (1975).
85. Westheimer, G.: The Spatial Grain of the Perifoveal Visual Field. In: *Vision Research*. 22. 157–162 (1982).
86. Westheimer, G.: Visual Acuity and Hyperacuity: Resolution, Localization, Form. In: *American Journal of Optometry and Physiological Optics*. 64. 567-574 (1987).
87. Westheimer, G.: Visual Acuity with Reversed-Contrast Charts: I. Theoretical and Psychophysical Investigations. In: *Optometry and Vision Science: Official Publication of the American Academy of Optometry*. 80. 745–748 (2003).
88. Westheimer, G.; Bass, M. (2010): *Vision and Vision Optics*. Visual Acuity and Hyperacuity (Kapitel 4). McGraw-Hill. New York 2010.
89. Westheimer, G.; Chu, P.; Huang, W.; Tran, T.; Dister, R.: Visual Acuity with Reversed-Contrast Charts: II. Clinical investigation. In: *Optometry and Vision Science: Official Publication of the American Academy of Optometry*. 80. 749–752 (2003).
90. Westheimer, G.; McKee, S.P.: Spatial Configurations for Visual Hyperacuity. In: *Vision Research*. 17. 941–947 (1977).
91. Westheimer, G.; McKee, S.P.: Integration Regions for Visual Hyperacuity. In: *Vision Research*. 17. 89–93 (1977).
92. Wilson, H.R.: Responses of Spatial Mechanisms can Explain Hyperacuity. In: *Vision Research*. 26. 453–469 (1986).
93. World Medical Association Declaration of Helsinki.: Ethical Principles for Medical Research Involving Human Subjects. In: *JAMA*. 310. 2191–2194 (2013).
94. Zemon, V.; James, G.; Janet, W.: Asymmetries in ON and OFF Visual Pathways of Humans Revealed Using Contrast-Evoked Cortical Potentials. In: *Visual Neuroscience*. 1. 145–50 (1988).

## 8 Danksagungen

Zunächst möchte ich meinem Betreuer Prof. Dr. Michael Hoffmann für die Bereitstellung des interessanten Themas und die gute Betreuung der letzten Jahre danken. Trotz eines stressigen Klinik- und Forschungsalltags fand er regelmäßig Zeit für einen Gesprächstermin und reagierte prompt auf Anfragen.

Auch Professor Dr. Bach gebührt an dieser Stelle ein herzliches Dankeschön. Einerseits stellte er das Messprogramm zu Verfügung und passte es unseren „Wünschen“ an, andererseits gab er wichtige Impulse.

Ich möchte mich darüber hinaus herzlich bei der gesamten Arbeitsgruppe bedanken, bei der ich mich sehr wohl gefühlt habe. Ein besonderer Dank gebührt Anne Herbig, die zum Gelingen der Arbeit mit ihrer Erfahrung beigetragen hat. Herrn Matthias half tatkräftig bei der Umsetzung des Messaufbaus. David Muranyi bin ich zu besonderem Dank verpflichtet, weil ich sehr von den Erkenntnissen seiner Doktorarbeit und seinen Erfahrungen profitiert habe. Glücklicherweise unterstützen mich bei der Datenerhebung Frau Wolff und Frau Kramer.

Auch meinen Probanden möchte an dieser Stelle danken, die immer, wie man im Fußballjargon zu sagen pflegt, „120% gaben“. Stand eine weitere Messreihe an, so erklärten sie sich zur erneuten Teilnahme bereit.

Mein abschließender Dank richtet sich an meine Eltern und meine beiden Brüder, die mich immer tatkräftig unterstützten. Ihnen widme ich diese Arbeit.

## 9 Ehrenerklärung

Ich erkläre, dass ich die der Medizinischen Fakultät der Otto-von-Guericke-Universität zur Promotion eingereichte Dissertation mit dem Titel

*Konventionelle Sehschärfe- und Übersehschärfe:*

*Vergleich photopischer und skotopischer Bedingungen*

in der Sektion für klinische und experimentelle Sinnesphysiologie der Klinik und Poliklinik für Augenheilkunde der Medizinischen Fakultät der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

mit Unterstützung durch Herr Prof. Dr. rer. nat. Michael Hoffmann

ohne sonstige Hilfe durchgeführt und bei der Abfassung der Dissertation keine anderen als die dort aufgeführten Hilfsmittel benutzt habe.

Bei der Abfassung der Dissertation sind Rechte Dritter nicht verletzt worden.

Ich habe diese Dissertation bisher an keiner in- oder ausländischen Hochschule zur Promotion eingereicht. Ich übertrage der Medizinischen Fakultät das Recht, weitere Kopien meiner Dissertation herzustellen und zu vertreiben.

Magdeburg, den

Philipp Freundlieb

## 10 Bildungsweg

-Sommer 2012: Abitur am Gymnasium am Moltkeplatz in Krefeld.

-10/2012: Beginn des Medizinstudiums an der Otto von Guericke-Universität in Magdeburg.

-08/2014: Absolvieren des ersten Abschnitts der ärztlichen Prüfung an der Otto von Guericke-Universität in Magdeburg.

-10/2015: Beginn der experimentellen Doktorarbeit mit dem Titel *konventionelle Sehschärfe- und Übersehschärfe: Vergleich photopischer und skotopischer Bedingungen* an der Augenklinik der Universitätsklinik in Magdeburg (Leitung Prof. Thieme) bei Prof. Hoffmann.

-10/2017: Absolvieren des zweiten Abschnitts der ärztlichen Prüfung an der Otto von Guericke-Universität in Magdeburg.

-11/2018: Absolvieren des dritten Abschnitts der ärztlichen Prüfung (Approbation) an der Otto von Guericke-Universität in Magdeburg.

-05/2019: Beginn der augenärztlichen Facharztausbildung am evangelischen Krankenhaus Mülheim a.d. Ruhr.