

**Technische Fachhochschule Berlin**  
University of Applied Sciences

Augenoptik/Optomietrie im Fachbereich VII



# **Testung von Sehfunktionen bei Vorliegen eines Zentralskotoms und exzentrischer Fixation**

## **Diplomarbeit**

Zur Erlangung des akademischen Grades  
**Diplom-Augenoptikerin / Optometristin (FH)**

Betreuerin: Prof. B. Krimpmann-Rehberg

Zweitgutachter: Prof. Dr. K. Schreck

vorgelegt von:  
Ivonne Fetchenheuer

Berlin, im Juli 2003

# Inhaltsverzeichnis

<b>1. EINLEITUNG .....</b>	<b>1</b>
<b>2. ANATOMIE DER NETZHAUT .....</b>	<b>2</b>
<b>2.1 DIE MAKULA.....</b>	<b>7</b>
<b>2.2 DIE PAPILLE.....</b>	<b>10</b>
<b>3. ERKRANKUNGSFORMEN DER MAKULA UND DES NERVUS OPTICUS.....</b>	<b>12</b>
<b>3.1 HEREDITÄRE NETZHAUTDYSTROPHIEN .....</b>	<b>12</b>
3.1.1 Makuladystrophie .....	12
3.1.2 Zapfendystrophie .....	13
3.1.3 Netzhautdystrophien mit zentralen und peripheren Veränderungen .....	14
3.1.4 Vitreoretinale Dystrophie mit zentralen Veränderungen.....	14
3.1.5 Netzhautdystrophie bei Myopie.....	15
<b>3.2 ALTERSABHÄNGIGE MAKULADEGENERATION.....</b>	<b>15</b>
<b>3.3 MAKULAFORAMINA .....</b>	<b>19</b>
<b>3.4 SEKUNDÄRE MAKULOPATHIE .....</b>	<b>20</b>
<b>3.5 ERKRANKUNGEN DES NERVUS OPTICUS.....</b>	<b>21</b>
<b>4. EXZENTRISCHE FIXATION UND DIE ENTSTEHUNG EINER PRL (PREFERRED RETINAL LOCUS) .....</b>	<b>22</b>
<b>4.1 FUNKTIONSPRÜFUNGEN DER MAKULA .....</b>	<b>23</b>
<b>4.2 ANPASSUNG AN EIN ZENTRALSKOTOM .....</b>	<b>26</b>
<b>4.3 LAGE DER PRL .....</b>	<b>28</b>
<b>4.4 LESEN MIT EINEM ZENTRALSKOTOM .....</b>	<b>29</b>
<b>4.5 MULTIPLE PRL .....</b>	<b>34</b>
<b>4.6 AKTUELLE STUDIEN ÜBER DIE EXZENTRISCHE FIXATION.....</b>	<b>35</b>
<b>5. PERIMETRIE .....</b>	<b>37</b>
<b>5.1 EINFÜHRUNG.....</b>	<b>37</b>
5.1.1 Die Lichtunterschiedsempfindlichkeit und die psychophysiologischen Gesetzmäßigkeiten des Lichtsinns.....	38
5.1.2 Definition der visuellen Reizschwelle .....	39
5.1.3 Störfaktoren und Artefakte .....	40
5.1.4 Vergleich der statischen und kinetischen Prüfmethode .....	41
<b>5.2 KINETISCHE PERIMETRIE.....</b>	<b>43</b>
<b>5.3 STATISCHE PERIMETRIE .....</b>	<b>46</b>
<b>5.5 DER BLINDE FLECK – DAS REFERENZSKOTOM.....</b>	<b>49</b>
<b>5.6 ZENTRALE GESICHTSFELDUNTERSUCHUNGEN .....</b>	<b>51</b>

5.6.1 Konfrontationstest.....	51
5.6.2 Die Kampimetrie.....	52
5.6.3 Skotometrie.....	54
5.6.3.1 Gesichtsfeldtestung nach Haitz.....	54
5.6.3.2 Amsler-Test.....	54
5.6.4 Das Scanning Laser Ophthalmoskop.....	56
<b>6. DAS COMPUTERISIERTE AUTO-PLOT-PERIMETER.....</b>	<b>59</b>
<b>6.1 DIE VERWENDETEN FIXATIONSMARKEN .....</b>	<b>61</b>
<b>6.2 BESCHREIBUNG DES AUTO-PLOT-PERIMETERS.....</b>	<b>63</b>
<b>6.3 VERSUCHSAUFBAU DER AUTO-PLOT-STUDIE.....</b>	<b>67</b>
<b>6.4 TESTPERSONEN.....</b>	<b>74</b>
<b>6.5 ERGEBNISSE .....</b>	<b>77</b>
6.5.1 Vergleich: Auto-Plot und Goldmann.....	77
6.5.2 Einfluss der Stimulusgröße.....	80
6.5.3 Lage des exzentrischen Fixationsareals.....	82
6.5.4 Abstand des exzentrischen Fixationsareals von der Skotomgrenze .....	87
6.5.5 Skotomdurchmesser und Wahl des exzentrischen Fixationsareals.....	88
6.5.6 Vergleich: Optikopathien und Netzhauterkrankungen .....	90
6.5.7 Vergleich: Ring und kleines Kreuz.....	92
6.5.8 Kontrolle des Fixationsverhaltens .....	98
6.5.9 Subjektive Einschätzungen der Testpersonen.....	100
<b>6.6 DISKUSSION.....</b>	<b>102</b>
<b>7. DIE EXZENTRISCHE KORREKTION BEI ZENTRALEN GESICHTSFELDAUSFÄLLEN .....</b>	<b>108</b>
<b>8. AUSBLICK.....</b>	<b>121</b>
<b>9. LITERATURVERZEICHNIS.....</b>	<b>122</b>
<b>10. ANHANG: AUFLISTUNG DER MESSERGEBNISSE .....</b>	<b>127</b>

## **1. Einleitung**

Erkrankungen der zentralen Netzhaut, insbesondere der Makula, und des Nervus opticus führen zu Funktionsausfällen im zentralen Gesichtsfeld. Neben einem Zentralskotom kann eine Veränderung der an die Foveola gebundenen Fixation erwartet werden. Es kommt zur exzentrischen Fixation, die letztendlich die verbleibende Sehfunktion bestimmt.

Die meisten herkömmlichen Untersuchungsmethoden beschränken sich auf die Funktionsprüfung im Bereich der zentralen Netzhaut, da das Auflösungsvermögen und daraus folgend der Visus dort am höchsten sind. Die Perimetrie ist eine der wenigen Techniken, die eine Untersuchung der Sehfunktion außerhalb der Makula ermöglicht, so dass die Lokalisation von Schäden innerhalb des visuellen Systems topographisch zugeordnet werden kann. Die Perimetrie vermittelt so eine Vorstellung über das Ausmaß der subjektiven Beeinträchtigung des Probanden und spielt als funktionsdiagnostische Untersuchungstechnik eine wichtige Rolle.

Da Zentralskotome zu Fixationsschwierigkeiten bei der Gesichtsfelduntersuchung führen und das besonders bei fortgeschrittenen Prozessen, werden Skotomgrenzen häufig ungenau dargestellt.

Ziel der vorliegenden Arbeit war es, die computerisierte Version des Auto-Plot-Perimeters zu testen und herauszufinden, ob das Programm verlässliche Ergebnisse erzielt und somit mit anderen Prüfmethode vergleichbar ist. Des Weiteren wurden verschiedene Fixationsmarken eingesetzt, um zu überprüfen, inwieweit Betroffenen, die an einem Zentralskotom leiden, geholfen werden kann, eine zentrale Ausrichtung der Fovea während der Messung zu erreichen.

## 2. Anatomie der Netzhaut

Den Sehvorgang kann man vereinfacht in drei Schritte unterteilen. Die von einem Objekt ausgehenden Lichtstrahlen werden vom optischen Apparat des Auges gebrochen. Das entstandene Bild wird durch die Photorezeptoren der Netzhaut in elektrische Impulse umgewandelt. Diese Informationen werden dann in der Netzhaut und im Sehzentrum des Gehirns verarbeitet. Jeder dieser Schritte beinhaltet mögliche Limitierungen für das visuelle System.

Die Netzhaut ist das entscheidende Element zur Verarbeitung visueller Informationen im Auge. Sie ist ein mehrschichtiges neuronales Gewebe und kann als ein vorgeschobener Teil des Zwischenhirns angesehen werden.

Das menschliche Auge ist, wie bei allen Wirbeltieren, aufgrund der embryonalen Entwicklung ein inverses Auge. Die lichtabsorbierende Rezeptorzellschicht befindet sich auf der lichtabgewandten Seite der Netzhaut. Der inverse Aufbau gewährleistet eine unmittelbare Nähe der Photorezeptoren zur Aderhaut, die für die Ernährung der Rezeptoren zuständig ist.

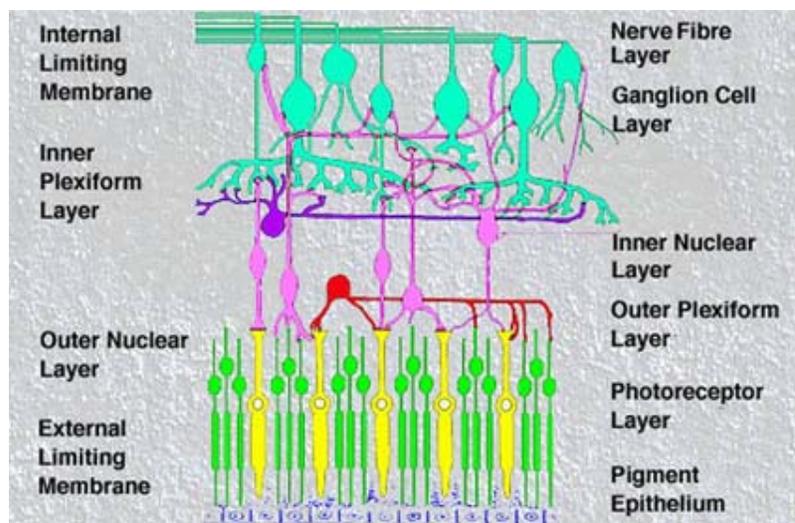


Abbildung 1: Anatomie der Netzhaut [63]

Die Netzhaut ist abgesehen von Fovea, Papille und Ora serrata typischerweise aus neun Schichten und dem Pigmentepithel aufgebaut.

Das retinale Pigmentepithel ist eine einschichtige Lage hexagonaler Zellen. Es erstreckt sich vom Papillenrand bis zur Ora serrata und geht übergangslos in das pigmentierte Ziliarepithel über.

Mit seinen apikalen Mikrovilli umschließt das Pigmentepithel die lichtempfindlichen Außensegmente der Photorezeptoren. Es steht somit in enger Interaktion mit den Photorezeptoren und sorgt für die Aufrechterhaltung ihrer Funktionen. Das retinale Pigmentepithel enthält ungefähr fünf Millionen Zellen. Durchschnittlich sind 25 Netzhautrezeptoren mit einer Pigmentepithelzelle in Kontakt. [17]

Zu den wichtigsten Aufgaben des retinalen Pigmentepithels gehören der Nähr- und Sauerstofftransport, der Vitamin-A Stoffwechsel, der Wärmeausgleich zur Aderhaut und die Lichtabsorption. Das Pigment Melanin sorgt dabei für die Reduktion von Streulicht und trägt somit zur Erhöhung der Abbildungsqualität bei. Melanin dient des Weiteren als Fänger freier Radikale.

Eine weitere wichtige Funktion des retinalen Pigmentepithels ist die "Entsorgung" von abgestoßenen Membranscheibchen der Photorezeptoren, die sich ständig erneuern. Pro Tag werden ca. 100 Membranscheibchen eines Photorezeptors abgestoßen und von der darunterliegenden retinalen Pigmentepithelzelle phagozytiert.

Das retinale Pigmentepithel bildet die äußere Blut-Retina Schranke, die dafür sorgt, dass nur kleinste Moleküle von der Aderhaut in die Netzhaut gelangen können und so ein unkontrollierter Stoffaustausch zwischen Aderhaut und Netzhaut verhindert wird.

Bei der ersten Schicht der Netzhaut handelt es sich um die Photorezeptoren, die auftreffendes Licht in neuronale Impulse umwandeln. Es gibt Stäbchen und Zapfen, deren Aussenglieder sich in Größe, Form und Funktion voneinander unterscheiden.

In den Zellmembranen der Aussenglieder befindet sich das Sehpigment Rhodopsin, dass die photochemische Reaktion auslöst.

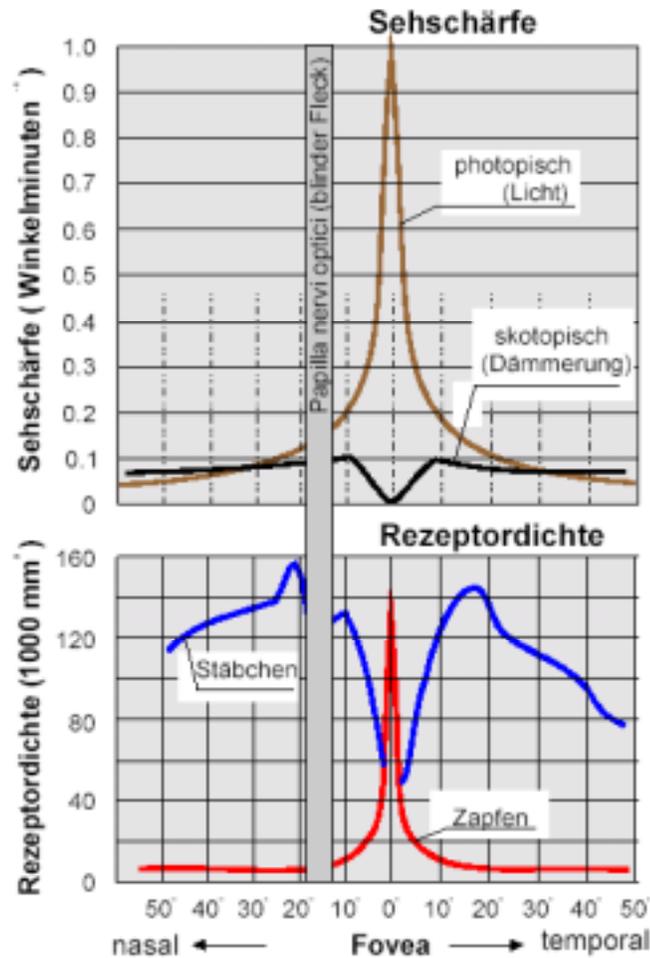


Abbildung 2: Verteilung der Photorezeptoren [54]

Die Einteilung der Photorezeptoren erfolgt anhand der Adaptationsleuchtdichten, bei denen diese Rezeptortypen aktiv werden. Bei niedrigen Adaptationsleuchtdichten von weniger als 0,01 cd/m<sup>2</sup> werden die Stäbchen aktiviert. Es handelt sich dann um das skotopisches Sehen. Das photopisches Sehen beginnt bei Leuchtdichten von mehr als 10 cd/m<sup>2</sup> und wird von den Zapfen übernommen. Im Übergangsbereich, dem mesopischen Sehen, reagieren sowohl Zapfen wie auch Stäbchen.

Die Zahl der Zapfen beträgt rund fünf Millionen pro Netzhaut. Sie besitzen eine geringere Lichtempfindlichkeit als die Stäbchen, haben aber ein hohes räumliches Auflösungsvermögen, welches für einen hohen Visus nötig ist. Sie sind außerdem sensitiver für direkte Axialstrahlen. Die Konzentration der Zapfen nimmt vom Bereich der Makula nach peripher drastisch ab. Die Verteilung der Zapfen außerhalb der Makula ist asymmetrisch. In der nasalen Netzhauthälfte finden sich ca. 40 % mehr Zapfen als in der temporalen Hälfte. Ganz am Rand der nasalen Peripherie kommt es nochmals zum Anstieg der Zapfen. Die Abnahme der Zapfen erfolgt vertikal schneller als horizontal.

Die Zapfen reagieren chromatisch; es gibt drei Zapfenarten. Die Blau-Zapfen haben ihr Maximum der Absorption bei 440 nm, die Grün-Zapfen bei 535 nm und die Rot-Zapfen bei 565 nm. Die Grün-Zapfen sind mit 55 % am häufigsten vertreten. [5]

Die normale volle Sehschärfe von 1,0 wird nur mit der Fovea erreicht. Das Auflösungsvermögen der Netzhaut nimmt schon wenige Winkelgrade neben der Fovea stark ab. Der Visus sinkt schon bei einer Exzentrizität von 2° auf 0,5.

Die Zahl der Stäbchen kann zwischen verschiedenen Individuen erheblich variieren. Als Mittelwert werden 92 Millionen Stäbchen angenommen. Stäbchen sind kleiner als Zapfen und ihre Außensegmente sind zylinderförmig. Sie besitzen eine hohe Lichtempfindlichkeit, haben aber dafür eine geringe räumliche Auflösung. Stäbchen reagieren sensitiv auf Streulicht und sind achromatisch.

Die Verteilung der Stäbchen innerhalb der Retina ist ebenfalls asymmetrisch. Die Foveola weist keine Stäbchen auf, weiter peripher kommt es zu einem rapiden Anstieg der Stäbchenpopulation. Die höchste Stäbchendichte liegt auf einem elliptischen Ring um die Papille. In der Netzhautperipherie dominieren die Stäbchen.

Die zweite Schicht der Retina, die äußere Grenzmembran, wird durch die äußeren Schlussleisten der Müller'schen Stützzellen, welche für die Aufrechterhaltung der Struktur der Retina eine große Bedeutung haben, gebildet.

Die Zellkerne der Photorezeptoren bilden die dritte Schicht, die äußere

Körnerschicht.

In der vierten Schicht, der äußeren plexiformen Schicht, nehmen die Photorezeptoren mit den nachgeschalteten Bipolarzellen sowie den Horizontalzellen Verbindung auf. Deren Zellkerne sowie die Kerne der Amakrin- und der Müllerzellen sind in der fünften Schicht, der inneren Körnerschicht, zusammengefasst.

Bipolarzellen stellen die Verbindung zwischen Photorezeptoren und retinalen Ganglienzellen dar. Die Signale der Photorezeptoren werden durch synaptische Kontakte auf die Bipolarzellen und Horizontalzellen übertragen und in diesen Zellen durch langsame Membranpotentialänderungen verrechnet. Die Signale der Bipolarzellen werden dann auf die Ganglienzellen übertragen. Alle drei Neuronentypen bilden ein Netzwerk, welches eine erste Verarbeitung der visuellen Information innerhalb der Netzhaut gestattet.

In der inneren plexiformen Schicht, der sechsten Schicht, erfolgt die Verschaltung mit den Ganglienzellen, deren Zellkerne in der siebten Schicht (Ganglienzellschicht) zusammengefasst sind.

Es gibt etwa eine Million retinale Ganglienzellen. Seit langem ist bekannt, dass Ganglienzellen unterschiedlich auf Lichtreize im Sinne von On- bzw. Off-Antworten reagieren, wobei diese Ganglienzellen im Hinblick auf die Dauer dieser Antwort weiter differenziert werden können (X-, Y- und W-Zellen). In der Peripherie ist eine Vielzahl von Photorezeptoren mit einer Ganglienzelle verschaltet. Die Signalkonvergenz nimmt zum Gesichtsfeldzentrum ab und in der Fovea erhält jede Ganglienzelle nur direkte Informationen von einem Zapfen. Dies unterstreicht die hohe Bedeutung dieser Region.

Da ein Photorezeptor außerhalb der Fovea mit mehreren Bipolarzellen verbunden ist und diese wiederum Kontakt mit mehreren Ganglienzellen haben, besteht auch eine erhebliche Signaldivergenz.

Die Konvergenz und die Divergenz der Verknüpfungen in der Netzhaut bilden die Grundlage für die funktionelle Organisation der rezeptiven Felder der

Ganglienzellen. Alle Rezeptoren, die auf eine Ganglienzelle verschaltet sind, bilden das rezeptive Feld dieser Ganglienzelle. Von diesem Netzhautareal kann die Ganglienzelle gehemmt oder erregt werden. Rezeptive Felder haben eine kreisförmige Struktur und sind oft aus funktionell verschiedenwertigen Netzhautarealen zusammengesetzt. Die von verschiedenen Stellen eines rezeptiven Feldes ausgelösten Impulse werden durch die Ganglienzelle summiert. Die Ausdehnung der rezeptiven Felder nimmt von der Fovea zur Netzhautperipherie zu, da in der Netzhautperipherie eine Ganglienzelle von vielen Photorezeptorzellen innerviert wird. Das rezeptive Feld und nicht der einzelne Photorezeptor ist somit die funktionelle Grundeinheit der Netzhaut.

In der achten Schicht ziehen die Ganglienzellen zur Papille des Nervus opticus. Die neunte Schicht, die innere Grenzmembran, bildet die Basalmembran der Müller'schen Stützzellen. Sie stellt die Grenze zwischen Retina und Glaskörper da.

Die Netzhaut ist in einen hinteren sehenden (pars optica) und einen vorderen Anteil (pars caeca), der keine Photorezeptoren enthält, unterteilt. Der Übergang findet an der Ora serrata statt.

Die Netzhaut wird anatomisch in folgende Bereiche eingeteilt:

- Makula- hinterer Augenpol zwischen der temporalen Gefäßarkade
- Mittlere Peripherie zwischen der temporalen Gefäßarkade und Äquator
- Äußere Peripherie zwischen Äquator und Ora serrata

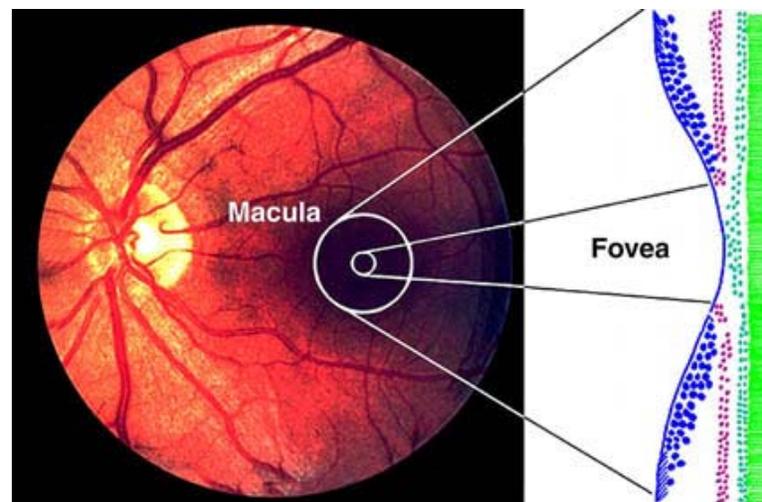
## **2.1 Die Makula**

Den für das Sehen wichtigsten Bereich der Netzhaut stellt die Makula dar. Sie ist der funktionell am höchsten ausdifferenzierte, aber auch am höchsten anfällige Netzhautabschnitt. Sie ist gekennzeichnet durch das höchste Auflösungsvermögen, das beste Farberkennungsvermögen, ein eingeschränktes Dunkeladaptationsvermögen und kortikal gesteuerte Reflexionseigenschaften zur

Fixation. [38]

Die Makula ist ein ovales, stark pigmentiertes Gebiet am hinteren Augenpol. Die starke Pigmentierung entsteht durch die Einlagerung des gelben Farbstoffes Lutein, der blaues Licht absorbieren soll. Da die blauen Lichtanteile die energiereichste Strahlung darstellen, können diese photochemische Netzhautschäden hervorrufen.

Eine weitere Funktion des Lutein ergibt sich aus der chromatischen Aberration des Auges, durch die Zerstreuungskreise auf der Netzhaut entstehen. Das wirkt sich ungünstig auf das Sehen aus. Deshalb filtert das Pigment Lutein die blauen Anteile teilweise heraus, bevor sie in den Außensegmenten der Netzhaut absorbiert werden können.



**Abbildung 3: Die Makula [63]**

Umbo, Foveola, Fovea, Parafovea und Perifovea bilden zusammen die Makula. Sie misst ca. 6 mm und erreicht an ihrem nasalen Rand fast die Papille. Im Zentrum der Makula befindet sich eine Einsenkung, die Fovea, die aus einem Wall, einem Abhang und einer zentralen Mulde besteht. Die zentrale Mulde entspricht der Foveola, im Zentrum dieser Mulde, genannt Umbo, schneidet die optische Achse die Retina.

Der Durchmesser der Foveola beträgt 0,35 mm entsprechend einem Winkel von 1°.

Sie besteht nur aus Zapfen und den Fortsätzen der sie umgebenden Gliazellen. Sie enthält 10 % der Gesamtzahl der Zapfen. Die für blau zuständigen Zapfen sind in der Foveola nicht vorhanden.

Die Bipolar- und Ganglienzellen sind an den Rand der Foveola gedrängt. Die Foveola stellt sich außerdem als avaskuläre Zone da. Es entfallen somit einige lichtstreuende Strukturen, was ein hohes Auflösungsvermögen ermöglicht.

Die sich in der Fovea befindenden Zapfen haben einen Durchmesser von 1,5 Microns und die Zellwände sind 0,5 Microns von einander entfernt. Daraus ergibt sich eine Distanz von 2 Microns von einem Zapfenzentrum zum nächsten. Da zwei Punkte nur dann getrennt voneinander wahrgenommen werden können, wenn ein nicht stimulierter Zapfen zwischen zwei stimulierten Zapfen liegt, ist eine Trennung der Netzhautbilder von 4 Microns notwendig.

Um dieses theoretische Auflösungsvermögen nutzen zu können, muss jede Rezeptorzelle nur eine Nervenzelle innervieren, wie es in der Fovea der Fall ist.

Die Fovea wird von zwei ringförmigen Zonen umgeben. Unmittelbar an die Fovea schließt sich die Parafovea an, die ungefähr eine Breite von einem Millimeter besitzt. Dort befindet sich die größte Dichte von Bipolarzellen.

Die Perifovea ist der äußere Ring der Makula. Die Perifovea beginnt dort, wo die Ganglienzellschicht aus vier Lagen aufgebaut ist und endet, wo die Ganglienzellschicht nur noch aus einer Zelllage besteht. Sie erstreckt sich bis zu einer Exzentrizität von 15°. [5]

Die Funktion des zentralen Bereiches ist von der hohen Dichte der Zapfen geprägt. Unterschiede in der Dichte und der Anordnung der Zapfen sind auf die Entwicklung, Funktion und Evolution des visuellen Systems zurückzuführen. Die sehr eng gepackten Zapfen der Fovea, die eine hexagonale Form aufweisen, sind so angepasst, dass mit ihnen ein hoher Visus erreicht werden kann.

Das Zapfenmosaik in der Peripherie ist dagegen nicht so gut strukturiert. Aufgrund der Anatomie dient die periphere Netzhaut eher dem Kontrast- und Bewegungssehen

sowie der Erkennung großer Objekte. Die periphere Netzhaut gewinnt vor allem in der Dämmerung an Bedeutung.

Wenn man das zentrale Sehen mit dem peripheren Sehen vergleicht, kann man von einer „Dualität des Sehens“ sprechen, da Zentrum und Peripherie unterschiedliche Aufgaben besitzen. Eine hohe Detailauflösung, ein gutes Wahrnehmungsvermögen für langsame Bewegungen in der Fovea dienen der genauen Identifizierung von Objekten. Eine hohe zeitliche Auflösung, ein gutes Wahrnehmungsvermögen für schnelle Bewegungen ermöglichen der peripheren Netzhaut die rasche Erfassung von Gefahrenobjekten, deren genaue Identifizierung nach Blickzuwendung in der Fovea erfolgt. [18]

Die Peripherie macht über 95 % des Gesichtsfeldes aus (Exzentrizität über 15°), sie besitzt aber ein geringes Auflösungsvermögens. Gründe dafür sind die optische Qualität des peripheren Netzhautbildes, aber vor allem die geringe Zapfendichte und das hohe Konvergenzverhältnis zu den Ganglienzellen. [31]

## **2.2 Die Papille**

Ein weiteres wichtiges Gebiet am hinteren Augenpol stellt die Papille da. Sie ergibt sich aus dem inversen Aufbau des Auges. Da die Ganglienzellschicht auf der Innenseite der Netzhaut liegt, muss es eine Durchtrittsstelle geben, durch die hindurch die Axone der Ganglienzellen das Auge verlassen können. An der Papille laufen diese zusammen, um den Nervus opticus zu bilden. Von der kräftigen roten Farbe der Netzhaut hebt sich die Papille deutlich ab, weil sie eher blassrosa gefärbt ist. Sie ist temporal schärfer begrenzt und etwas blasser als nasal.[5]

Die Papille enthält keine Photorezeptoren und korreliert somit mit dem blinden Fleck im Gesichtsfeld. Normalerweise wird die Existenz des blinden Fleckes nicht bemerkt, da dieser Gesichtsfeldausfall vom Gehirn durch Anteile benachbarter Gesichtsfeldregionen aufgefüllt wird. Es handelt sich also um ein negatives Skotom.

Der Nervus opticus ist wie die Retina ein vorgeschobener Gehirnteil. Eine besondere Bedeutung hat das makulo-papilläre Bündel, der Anteil des Sehnervs, der die Sinnesinformationen der Makula fortleitet. Es nimmt die temporale Hälfte der Papille ein, verlagert sich aber im weiteren Verlauf des Sehnervs nach axial.

An der Retina endet der optische Teil des Sehens und der neuronale Teil mit Sehnerv, Chiasma opticum, Tractus opticus, seitlichem Kniehöcker, Sehstrahlung und Sehrinde des Großhirns beginnt.

Sehnerv, Chiasma opticum und Tractus opticus leiten die visuellen Informationen von der Netzhaut zum lateralen Kniehöcker und von dort zur Sehrinde des Großhirns, wo die primäre kortikale Verarbeitung, die „Bildanalyse“ beginnt, um sich dann in mehr als 30 spezifischen Gehirnarealen fortzusetzen.

### **3. Erkrankungsformen der Makula und des Nervus opticus**

Erkrankungen der Makula und des Nervus opticus einschließlich der höheren Sehbahn führen zu Funktionsausfällen, die bei der Untersuchung des Gesichtsfeldes als Zentralskotom auffällig werden. Neben einem Zentralskotom kann eine Veränderung der an die Foveola gebundenen Fixation erwartet werden.

Zentralskotome haben eine starke Herabsetzung der zentralen Sehschärfe zur Folge. Es kommt bei beiden Erkrankungsformen auch zu einer generellen Senkung des Empfindlichkeitsniveaus der Netzhaut. Bei Optikuserkrankungen ist der gesamte Sehnerv je nach Sitz und Ausmaß der lokalen Schädigung mehr oder weniger mit betroffen. Bei entzündlichen Erkrankungen der zentralen Netzhaut spielt die Ausdehnung und Lokalisation des serösen Ergusses zwischen Pigmentepithel und sensorischer Netzhaut eine Rolle. Bei degenerativen Störungen steht dagegen die arterielle Minderversorgung im Vordergrund. [38]

#### **3.1 Hereditäre Netzhautdystrophien**

Hereditäre Netzhautdystrophien sind eine sehr heterogene Gruppe von Erkrankungen. Sie sind charakterisiert durch einen progressiven Funktionsverlust der Netzhaut und können in allen Lebensaltern auftreten. Mutationen in Genen, die für die Struktur oder die Funktion von Photorezeptoren, retinalen Pigmentepithelzellen und anderen retinalen Zellen verantwortlich sind, führen zu verschiedenen Krankheitsbildern. Die morphologischen Veränderungen weisen eine erhebliche Variationsbreite auf. [26]

##### **3.1.1 Makuladystrophie**

Die strukturelle Besonderheit der Makula und Hinweise darauf, dass foveale Zapfen andere Gene exprimieren als periphere Zapfen sind wahrscheinlich dafür

verantwortlich, dass diese Dystrophien regional begrenzt sind und es zahlreiche Variationen gibt. Ca. 30 % aller Makuladystrophien lassen sich nicht eindeutig einem spezifischen Krankheitsbild zuordnen.

Die Stargardtsche Makuladystrophie und die vittelliforme Makuladystrophie gehören zu den am häufigsten und am auffälligsten in Erscheinung tretenden hereditären Dystrophien.

Die Stargardtsche Makuladystrophie mit autosomal-rezessiver Vererbung ist eine beidseitig-symmetrisch verlaufende Erkrankung. Die Veränderungen betreffen das Neuroepithel unter Einbeziehung des Pigmentepithels, es entstehen zentrale Pigmentepitheldestruktionen. Im Verlauf der Erkrankung kann der Fundus flavimaculatus hinzukommen, der durch gelbliche, unscharf begrenzte Flecken gekennzeichnet ist. Im fortgeschrittenen Stadium besteht zentral ein Narbenareal.

Das Frühstadium der vittelliformen Makuladystrophie (M. Best), die autosomal-dominant vererbt wird, ist gekennzeichnet durch eine Zyste, die im Verlauf der Erkrankung zerfällt. Es entsteht ein sogenanntes Pseudohypopyon mit horizontaler Spiegelbildung. Dem Zerfall der Zyste folgen Pigmentepitheldefekte und Schwund der makulären Netzhaut. [26, 27]

Die kongenitale x-chromosomale Retinoschis sowie die zentrale areoläre Aderhautdystrophie sind weitere Beispiele für Makuladystrophien.

### **3.1.2 Zapfendystrophie**

Wesentliches Merkmal dieser Erkrankung ist eine auf die Zapfen begrenzte Dystrophie. Die Peripherie ist im allgemeinen nicht betroffen. Zentrale Pigmentepitheldefekte mit zum Teil erhaltenen Pigmentepithelresten bis hin zu einer Schiessscheiben-Makulopathie können vorliegen. Eine Abgrenzung gegen die häufigeren Zapfen-Stäbchendystrophien ist nur im Verlauf durch den fehlenden

Funktionsverlust der Stäbchen möglich. Die Blendempfindlichkeit ist bei Zapfendystrophien stärker ausgeprägt als bei Makuladystrophien. Autosomal-dominante, rezessive und x-chromosomale Erbgänge wurden beschrieben. [26]

### **3.1.3 Netzhautdystrophien mit zentralen und peripheren Veränderungen**

Bei der makulären Form einer diffusen Netzhautdystrophie bestehen ausgedehnte Strukturveränderungen der Makula sowie knochenkörperchenartige Pigmentierungen in der Peripherie. Die Papille ist durch eine wachsgelbe Atrophie gekennzeichnet. Die Dunkeladaptation ist mit dem Fortschreiten der Dystrophie reduziert. Der Vererbungsmodus ist autosomal-rezessiv.

Bei der retinalen Dystrophie mit wabenförmigen Defekten kommt es im zentralen Bereich der Netzhaut zu einem vollständigen Defekt des Pigmentepithels. In der Peripherie sind girlandenartige Begrenzungen und wabenförmige Defekte erkennbar.

Die Sorsby'sche Fundusdystrophie ist eine autosomal-dominant vererbte Netzhautdystrophie. Bei dieser relativ seltenen Erkrankung ist das erste Symptom Nachtblindheit, im weiteren Verlauf gefolgt von zentralem Sehverlust in der Makula, der durch Gefäßwucherungen und Blutungen im subretinalen Raum bedingt ist und schließlich auch zum Verlust des peripheren Sehens führt. [27]

### **3.1.4 Vitreoretinale Dystrophie mit zentralen Veränderungen**

Diese Erkrankung ist durch eine ausgeprägte Dystrophie der Netzhaut und des Glaskörpers gekennzeichnet. Zentral ist die Netzhaut und das retinale Pigmentepithel nicht mehr erkennbar, so dass die Sklera sichtbar wird. Die Glaskörperstruktur ist auf wenige Stränge reduziert. Es liegt ein autosomal-rezessiver Vererbungsmodus bei Blutsverwandtschaft der Eltern vor. [26]

### **3.1.5 Netzhautdystrophie bei Myopie**

Bei hochgradigen Myopien kann es zu zentralen Dystrophien kommen. Es finden sich große atrophische Areale am hinteren Augenpol, die das retinale Pigmentepithel einbeziehen. Es kann zusätzlich zu Blutungen kommen, so dass ein Fuchsscher Fleck entsteht. Der Glaskörper ist ebenfalls hochgradig verändert.

Die Myopie ist durch genetische Heterogenität gekennzeichnet. Der Vererbungsmodus ist meist autosomal-dominant. [26]

### **3.2 Altersabhängige Makuladegeneration**

In den Industrieländern ist die altersabhängige Makuladegeneration (AMD) die häufigste Ursache für eine Erblindung bei Personen über 50 Jahre. Besonders die exudative Form der AMD, bei der sich choroidale Neovaskularisationen (CNV) entwickeln, führt oft in kürzester Zeit zu einem dramatischen Visusverlust.

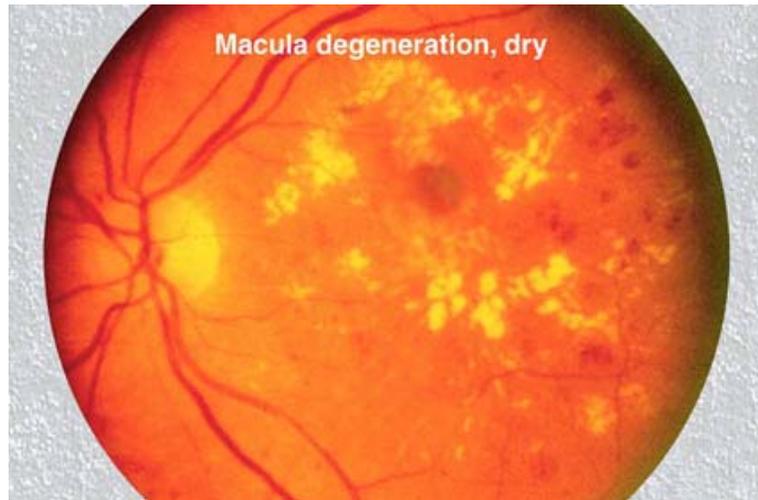
In ca. 75 % erkrankt auch das zunächst unbetroffene Auge. [28]

Es ist davon auszugehen, dass die Anzahl der AMD-Erkrankungen zunehmen wird, da die Bevölkerung aufgrund der erhöhten Lebenserwartung immer älter wird. Für die Vereinigten Staaten von Amerika wurde z.B. ermittelt, dass bis zum Jahr 2020 mit einer Verdreifachung der Personen zu rechnen ist, die älter als 85 Jahre sind.

Die altersabhängige Makuladegeneration ist eine sehr komplexe Erkrankung, die sich in ganz unterschiedlichen Erscheinungsformen manifestieren kann. Die Ursachen sind ebenfalls sehr vielseitig. Es weist aber vieles darauf hin, dass das retinale Pigmentepithel und die Bruchsche Membran eine wesentliche pathophysiologische Rolle besitzen.

Es ist schwierig ein einheitliches Klassifikationssystem für diese Erkrankung zugrunde zu legen. Eine internationale Studiengruppe hat 1995 ein Klassifikationssystem vorgestellt, das die altersabhängige Makuladegeneration in

die altersabhängige Makulopathie und die altersabhängige Makuladegeneration unterteilt. Es beruht vornehmlich auf Fundusphotographien der Makula. Der Visus wird nicht berücksichtigt. [1]



**Abbildung 4: nicht-exudative Makuladegeneration [63]**

Die altersabhängige Makulopathie umfasst alle Stadien der Erkrankung. Innerhalb dieser Definition werden Drusen und Pigmentepithelveränderungen unterteilt nach Aspekt, Anzahl und Größe.

Die altersabhängige Makuladegeneration entspricht dem Endstadium.

Man unterscheidet grundsätzlich zwei Arten der altersabhängigen Makuladegeneration, die nicht-exudative und die exudative Form

Patienten mit Drusen als alleiniger Veränderung der Retina haben meist einen guten Visus. Drusen müssen aber als Vorstufe für die Entstehung einer altersabhängigen Makuladegeneration angesehen werden.

Man unterscheidet fokal harte und weiche Drusen im Gegensatz zu flächigen, diffusen Drusen. Fokale Drusen stellen Ablagerungen unter der Basalmembran des retinalen Pigmentepithels bzw. in der inneren Schicht der Bruchschen Membran dar.

Das kann zu spontanen Veränderungen führen. So können harte Drusen mit der Zeit in weiche übergehen. Es kann auch zur Abhebung des retinalen Pigmentepithels kommen, wenn sich weiche Drusen vergrößern. Drusen können auch kalzifizieren. Sie weisen dann kristalline Anteile auf.

Diffuse Drusen sind für die Entstehung visusmindernder Läsionen wahrscheinlich bedeutungsvoller als fokale Drusen. Unterschieden werden basale laminae Ablagerungen zwischen der Plasmamembran und der Basalmembran des retinalen Pigmentepithels und basale lineare Ablagerungen, die diffuse Verdickungen des inneren Anteils der Bruchschens Membran darstellen. [28]

Zur nicht-exudativen Form zählen Drusen, atrophische und hypertrophische Veränderungen des retinalen Pigmentepithels. Es kann bei der nicht-exudativen Makuladegeneration zu einer Herabsetzung des Visus kommen, vor allem wenn eine Atrophie des retinalen Pigmentepithels in der Fovea auftritt. Dabei gehen nicht nur Pigmentepithelzellen sondern auch die angrenzende Choriocapillaris und darüber liegende Photorezeptoren zugrunde. [28]

Neben der geographischen Atrophie des retinalen Pigmentepithels sind die Pigmentepithelabhebung, Risse des retinalen Pigmentepithels und die choroidale Neovaskularisation als Gründe für einen erheblichen Visusverlust zu nennen. Choroidale Neovaskularisationen führen zur exudativen Form, die für bis zu 90% der schwereren Sehverluste in Zusammenhang mit AMD verantwortlich sind.

Normalerweise werden die Zellreste der Membranscheibchen der Photorezeptoren mit Hilfe des retinalen Pigmentepithels abgebaut. Im Alter kann häufig der Abbau nicht mit der Abstoßungsrate der Photorezeptoren Schritt halten. Es kommt zu Ablagerungen im Pigmentepithel. Der ansteigende Lipofuscingehalt wirkt sich negativ auf die Funktion und das Überleben von RPE-Zellen aus. Lipofuscin wird allgemein als Biomarker für zelluläre Alterung und kumulativer Index für eine oxidative Schädigung angesehen. Im retinalen Pigmentepithel akkumuliert Lipofuscin als Nebenprodukt der Phagozytose lipidreicher Membranscheibchen der Photorezeptoren. Lipofuscin wird solange im Pigmentepithel gespeichert, bis dessen

Speicherkapazität ausgeschöpft ist. Danach kommt es zu Ablagerungen der unverdaulichen Zellreste in der Bruchschens Membran und es kommt zu einer empfindlichen Störung der Diffusion von Nährstoffen von Aderhaut zur Netzhaut. Die Einlagerung von inkomplett abgebauten Stoffwechselprodukten zeigt sich in Form von Drusen.[1]

Defekte in der Bruchschens Membran werden mit der Entstehung von choroidalen Neovaskularisationen in Verbindung gebracht, genauso wie entzündliche Prozesse und Wachstumsfaktoren, zu denen zum Beispiel der vaskuläre Endothelwachstumsfaktor (VEGF) gehört. Eine vermehrte Produktion von VEGF führt zu einem Einsprossungsreiz für die Aderhautkapillaren. Bei der exudativen AMD entstehen choroidale Neovaskularisationen, bei denen Kapillare aus der Aderhaut durch die Bruchsche Membran unter oder über das retinale Pigmentepithel wachsen. Aus choroidalen Neovaskularisationen treten häufig Flüssigkeiten wie zum Beispiel Blut aus. Deshalb wird häufig der Begriff „feuchte“ Makuladegeneration benutzt.[7]

Choroidale Neovaskularisationen weisen irreguläre Grenzen auf, zeigen oft ein aggressives Wachstum und können unbehandelt nach Ausdehnungen unter die Fovea schnell zu einem starken Sehverlust führen. Die Entstehung einer „disziformen“ Narbe mit vollständigem Verlust der retinalen Strukturen charakterisiert das Endstadium.

Der Abbau der Membranscheibchen ist stark von oxidativen Prozessen beeinflusst. Das Zentrum der Makula hat aufgrund ihrer Funktion eine höhere Sauerstoffkonzentration als die periphere Netzhaut. Das Pigment Lutein dient der Makula als Schutz gegen die entstehenden freien Radikale und verhindert möglicherweise die Entstehung einer AMD. Ein Hinweis darauf könnte sein, dass das Zentrum der Fovea, das den höchsten Anteil von Lutein besitzt, meist erst sehr spät von einer Atrophie betroffen wird. Meist beginnt die Atrophie in der Perifovea. Die dort vorhandenen Stäbchen werden als Ursache angesehen, da sie als erste degenerieren. Ausgehend von der gleichen Netzhautstelle ist der Verlust von

Stäbchen grundsätzlich größer als der Verlust von Zapfen. Die Ursache liegt darin, dass Zapfen resistenter gegen konstante Lichtexposition sind als Stäbchen.

Bisher ist noch nicht bekannt, wie hoch der Grad der Lichtexposition sein muss, um eine Schädigung der Photorezeptoren zu bewirken.[1]

Der wichtigste Risikofaktor für die Entstehung einer AMD ist das Alter. Die Prävalenz der Erkrankung nimmt mit dem Alter zu, wobei die Prävalenz der Endstadien von 1 % bei Personen von 65 bis 74 Jahren auf bis zu 5 % bei Personen im Alter von 75 bis 84 Jahren steigt.

Weitere Risiken, die eine Entstehung der altersabhängigen Makuladegeneration begünstigen sind hoher Blutdruck, Rauchen, Arteriosklerose, Stoffwechselerkrankungen wie z. B. Diabetes, das Geschlecht und auch genetische Determinanten. Aufgrund der späten Manifestation und der anzunehmenden Beteiligung einer Vielzahl von Genen ist es aber schwierig die genetischen Komponenten zu ermitteln.[28]

### **3.3 Makulaforamina**

Makulaforamina können im Rahmen verschiedener Krankheitsbilder zu komplizierten Netzhautablösungen im Makulabereich führen. Heute unterscheidet man traumatische und sekundäre Makulaforamina anderer Genese von idiopathischen Makulaforamina. Diese betreffen typischerweise gesunde Frauen mit unauffälliger Refraktion in der 7. und 8. Lebensdekade.

Der Grund für die Entstehung von idiopathischen Makulaforamina steht dabei im Zusammenhang mit den normalen Alterungsprozessen des Auges. Normalerweise liegt der Glaskörper fest an der Netzhaut an. Im Alter verflüssigt sich der Glaskörper, was dann dazu führen kann, dass der Glaskörper sich von der Netzhaut löst. Dabei trennt er sich aber häufig nicht von der Makula und übt so Zug aus. Die Entstehung eines Makulaforamen kann Monate dauern und ist in vier Stadien

unterteilt.

Stadium I ist charakterisiert durch eine verminderte oder aufgehobene Foveavertiefung und die Entwicklung eines kleinen, runden, gelben Flecks (IA) oder eines gelben Rings (IB) im Zentrum der Fovea. Ein exzentrisch gelegener durchgreifender Defekt der Retina kennzeichnet das Stadium II. Im Stadium III kommt es zu einem runden, ungefähr 500 µm großem Defekt der Retina, der von einem Halo, der einer Netzhautablösung entspricht, umgeben ist. Eine zusätzliche Ablösung des hinteren Glaskörpers bezeichnet man als Stadium IV. [17, 52]

Ein kompletter Verlust des zentralen Gesichtsfeldes entsteht nur dann, wenn das Foramen die komplette Schicht der Netzhaut betrifft.

Zu den Ursachen für die sekundären Makulaforamina gehören die proliferative Vitreoretinopathie mit zentralen Traktionsforamina, hochmyope Augen, bei denen in atrophischen Arealen der Choroidea Foramina auftreten können. In seltenen Fällen können auch durch lokalisierte Traktion Makulalöcher entstehen, wie zum Beispiel bei einer Uveitis oder einem Venenastverschluss.

Die Perforation oder die Prellung des Augapfels können traumatische Makulalöcher hervorrufen. [27]

### **3.4 Sekundäre Makulopathie**

Entstehungsursache für eine sekundäre Makulopathie kann eine zystische Schädigung als Reaktion nach einer Kataraktoperation, eine zystische Degeneration bei Retinitis pigmentosa oder ein pseudokolobomartiger Narbenherd bei Toxoplasmose sein.

### 3.5 Erkrankungen des Nervus Opticus

Die Erkrankungen des Nervus Opticus lassen sich wie folgt einteilen:

- Vaskuläre
- Endzündliche
- Toxische
- Traumatische
- Hereditäre Optikopathien. [3]

Entsprechend dem Ausmaß und der Lokalisation der Schädigung kommt es zu Nervenfaserbündeldefekten der abhängigen Region des Gesichtsfeldes. Nervenfasern aus der Netzhautperipherie verlaufen am Rand des Sehnervs, während sich die Nervenfasern aus der zentralen Netzhaut im inneren des Sehnervs befinden.

Es entsteht ein Zentralskotom, wenn die Fasern des makulo-papillären Bündels betroffen sind, was relativ häufig vorkommt, da das makulo-papilläre Bündel zuerst eine temporale Lage im Sehnerv besitzt.

Da in der vorliegenden Studie drei Testpersonen teilnahmen, die an einer Leberschen Optikusatrophie erkrankt waren, wird auf diese Erkrankung näher eingegangen. Die Lebersche Optikusatrophie gehört zu den am häufigsten auftretenden hereditären Optikusatrophien. Sie wird nicht über die genetische Information des Zellkerns vererbt, sondern über die genetische Information der Mitochondrien im Zellplasma und tritt vor allem bei Männern zwischen dem 15. und 35. Lebensjahr auf. Bei der Erkrankung entsteht ein Schwund des Sehnervs, der vor allem einen Ausfall des zentralen Gesichtsfeldes meistens an beiden Augen bewirkt. [36]

#### **4. Exzentrische Fixation und die Entstehung einer PRL**

Aufgrund des hohen Auflösungsvermögens und der Farbwahrnehmung ist die normale Funktion der Fovea von entscheidender Bedeutung für das Sehen. Ein zentraler Gesichtsfeldausfall reduziert die Fähigkeit der Betroffenen normalen Dingen des Lebens nachzugehen. Zentrale Gesichtsfeldausfälle führen nicht zu völliger Erblindung, da das periphere Gesichtsfeld und damit das räumliche Orientierungsvermögen erhalten bleibt. [17]

Oft bemerken die Betroffenen den zentralen Gesichtsfeldausfall zunächst nicht, selbst wenn der Gesichtsfeldausfall um die 20° beträgt. Zur und Ullmann untersuchten 70 Patienten mit altersabhängiger Makuladegeneration, bei denen sie einen aktives „Ausfüllen“ des visuellen Systems nachweisen konnten. Diese Studie unterstützt die Theorie, dass die fehlenden Informationen, die aus den defekten Netzhautstellen entstehen, vom Gehirn aktiv ausgefüllt werden, und nicht nur einfach von den Betroffenen ignoriert werden.

An Katzen und Affen durchgeführte Studien haben ergeben, dass nach einer Läsion eine topographische Reorganisation in der Sehrinde des Gehirns stattfindet. Dabei werden die rezeptiven Felder der kortikalen Zellen umgeformt und die Sensibilität der betroffenen Zellen der Sehrinde erhöht. Die kortikale Reorganisation nach einer Läsion kann zwar die Funktion des zerstörten Gewebes nicht wiederherstellen, aber es kann dabei helfen, die entstandenen Gesichtsfelddefekte „auszufüllen“. [65]

Nur sehr wenige Betroffene, die an einem zentralen absoluten Skotom leiden, nehmen ein „schwarzes Loch“ in der Mitte ihres Gesichtsfeld wahr. Die meisten beschreiben ihr Sehen eher so, dass Objekte verschwinden oder plötzlich aus dem nichts auftauchen. Manche Bereiche, die sich direkt vor ihnen befinden, erscheinen verschwommen.

#### 4.1 Funktionsprüfungen der Makula

Durch genetisch bedingte oder erworbene Veränderungen des zentralen Gesichtsfeldes kommt es zu spezifischen Funktionsstörungen.

Die folgenden Sehfunktionen werden dabei betroffen:

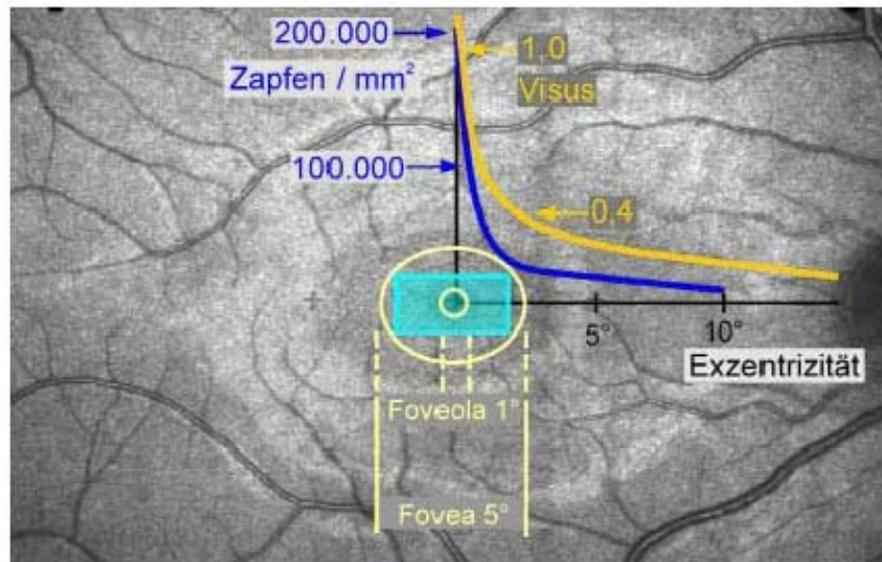
- Der Visus (aufgrund der herabgesetzten Dichte der funktionstüchtigen Zapfen)
- Die Lesefähigkeit (wenn Skotome im Lesefeld auftreten)
- Das Gesichtsfeld (aufgrund lokaler Ausfälle)
- Die zentrale Lichtunterschiedsempfindlichkeit (aufgrund der reduzierten räumlichen Integrationsfähigkeit von hellen Flächen)
- Die Farbunterschiedsempfindlichkeit (aufgrund der herabgesetzten Anzahl von rotempfindlichen, grünempfindlichen und blauempfindlichen Zapfen)
- Das Kontrastsehen (aufgrund der Auflockerung der rezeptiven Felder)
- Die Fixationsstabilität -und Präzision (aufgrund des Verlustes der Fovea)
- Die räumliche Wahrnehmung. [17, 28]

Die Bestimmung des Fernvisus mit Hilfe von Optotypen reicht nicht aus, um die Funktion der Makula vollständig zu beschreiben, da hierbei nur einzelne Optotypen im Bereich der Foveola geprüft werden. Zur Bestimmung des Fernvisus wird bei Low Vision Patienten meist die TO4-Tafel genutzt.

Der Fernvisus der Betroffenen lässt keine Rückschlüsse auf die Lesefähigkeit zu. Die Ermittlung des Vergrößerungsbedarfs mit Hilfe standardisierter Tafeln wie der Nahsehprobentafel der Firma Zeiss ist ein wichtiges Kriterium. Diese Tafel wird in einer Entfernung von 25 cm genutzt. Die Vergrößerung wird durch die großgedrucktem Buchstaben erzeugt. Der Faktor, um den die Buchstaben größer sind als normale Druckschrift, ist unter den Texten angegeben. Den Vergrößerungsbedarf schätzt man durch die kleinstmögliche erkannte Schriftgröße ab. Man nutzt die Sehprobentafel auch, um zu überprüfen, wie gut der Proband lesen kann. Voraussetzung für die erfolgreiche Nutzung einer vergrößernden Sehhilfe ist, dass

zusammenhängende Texte gelesen werden können.

Der Verlust der Lesefähigkeit wird meistens als wesentliche Beeinträchtigung erlebt. Sie kann zu Berufsunfähigkeit, Arbeitslosigkeit und Unselbständigkeit der Betroffenen führen. Der Erhalt und die Wiedererlangung der Lesefähigkeit sind deshalb der Schwerpunkt der Rehabilitation. Aufgrund der großen Bedeutung der Lesefähigkeit wurden und werden zahlreiche Studien zu dieser Thematik durchgeführt.



**Abbildung 5: das Lesegesichtsfeld [53]**

Da während einer Fixation stets eine ganze Gruppe von Buchstaben erfasst wird, ist ein Lesegesichtsfeld von einer bestimmten Mindestausdehnung erforderlich, etwa je 2° nach links und rechts vom Fixationspunkt und je 1° nach oben und unten. Dieses Mindestlesegesichtsfeld entspricht etwa dem Buchstabenerkennungsbereich und dem „visual span“. Seine Größe stimmt ziemlich genau mit der Ausdehnung der Fovea überein. [53]

Das retinale Auflösungsvermögen nimmt mit zunehmender Exzentrität rasch ab. Für das Erkennen von Zeitungsdruck in 25 cm ist ein Visus von ca. 0,4

erforderlich, der sich etwa am Rand der Fovea befindet.

Die Lesefähigkeit wird demnach durch das Auflösungsvermögen des benutzten Netzhautareals und durch dessen Mindestausdehnung limitiert.

Der Visus reflektiert jedoch nur einen Teilbereich der zentralen Sehfunktion. Die meisten natürlichen Sehvorgänge finden in einer gut strukturierten visuellen Umwelt statt. Sakkadische Blickbewegungen werden durch Fixationsperioden von 0,2–0,6 Sekunden unterbrochen. Diese Fixationsperioden dienen beim Lesen der Informationsaufnahme. Wie effektiv eine Fixationsperiode ist, hängt von der Frequenz und der Amplitude unwillkürlicher Mikrosakkaden ab. Sie definieren somit einen weiteren wesentlichen visuellen Funktionsparameter, die Fixationsstabilität.

Die Überprüfung des Gesichtsfeldes ist ein wichtiges Kriterium für die Funktionsprüfung der Netzhaut, da sie topographisch die Lichtempfindlichkeit jedes gewünschten Netzhautpunktes erschließt. Aufgrund des hohen Stellenwertes der Perimetrie wird im nächsten Kapitel darauf gezielt eingegangen.

Da Sehstörungen individuell unterschiedlich kompensiert werden, kann die Perimetrie keine hundertprozentige Auskunft darüber geben, mit welcher vergrößernden Sehhilfe der Einzelne gut zurecht kommt. Sie hilft aber dabei die individuellen Sehprobleme besser zu verstehen.

Pseudoisochromatische Tafeln sind für kongenitale Farbsinnstörungen konzipiert worden. Daher sind sie nicht für die Beurteilung von Farbsinnstörungen geeignet, die durch Degeneration der Makula oder durch Optikusatrophien entstehen. Der Panel-D-15-Test oder der FM-100-Hue-Test sind besser geeignet, da sie Auskunft über Art und Umfang der Farbsinnstörung geben. Eine Verlaufskontrolle ist damit ebenfalls möglich.

Das Anomaloskop kann ebenfalls hilfreich sein, um das Ausmaß der Zapfenfunktion zu bestimmen. Wenn die Zapfen in der Fovea weitgehend ausgefallen sind, übernehmen die Stäbchen den Helligkeitsvergleich der beiden Halbfelder, und der Proband stellt Helligkeitsabgleiche ein, die auf der „Achromatenachse“ liegen.

Gelegentlich kann eine Farbperimetrie sinnvoll sein, wie zum Beispiel bei einer x-

rezessiven Netzhauterkrankungen, bei denen eine Blau-Gelb-Schwäche vorliegt.

Erkrankungen der Makula führen häufig zu einer erhöhten Blendempfindlichkeit, die meist mit einer herabgesetzten Kontrastempfindlichkeit einhergeht. Das Nyktometer und das Mesoptometer haben sich hierbei bewährt. Bereits geringe Makulafunktionsstörungen können eine hohe Blendungsempfindlichkeit verursachen. [17]

Zu den objektiven Funktionsprüfungen der Makula zählt die Elektroretinographie. Besonders geeignet ist das multifokale ERG, welches ein topographisches Feinraster der Makulafunktion liefern kann, mit dem weit detailliertere Aussagen möglich sind als mit einer bloßen Visusbestimmung. Durch das hohe Auflösungsvermögen können so auch kleinste retinale Areale mit pathologischen Veränderungen aufgezeigt werden. Die retinale Funktionsprüfung mittels MF-ERG stellt eine sensible, nichtinvasive Ergänzung in der Früherkennung und Verlaufskontrolle von Makulaveränderungen dar. [29]

## **4.2 Anpassung an ein Zentralskotom**

Um die Ausbildung der exzentrischen Fixation zu verstehen, muss zu erst einmal der Begriff Skotom erklärt werden. Skotome sind retinale Gebiete, die eine reduzierte Lichtunterschiedlichkeitsempfindlichkeit aufweisen. Dabei wird die Lichtunterschiedsempfindlichkeit mit den Normwerten für die entsprechende Altersgruppe verglichen. Zentralskotome sind Netzhautbereiche mit reduzierter Lichtunterschiedsempfindlichkeit, welche die Fovea mit einschließen. Parazentrale Skotome befinden sich in den zentralen 20 ° des Gesichtsfeldes, beziehen die Fovea aber nicht mit ein. [15, 16]

Skotome sind weiterhin durch die Lichtintensität der Stimuli, die bei der Erschließung der Ausdehnung des Skotoms genutzt wurde, definiert. Ein absolutes Skotom liegt vor, wenn an einem Netzhautort keine Lichtwahrnehmung möglich ist.

Die Definition eines absoluten Skotoms ist abhängig vom verwendeten Perimeter. Die Lichtunterschiedsempfindlichkeit ist abhängig von der maximalen Leuchtdichte des Stimulus. [18]

Mit Schädigung des zentralen Gesichtsfeldes entwickelt sich aus der lokalisierten fovealen Fixation ein immer diffuseres Fixationsareal, bis sich schließlich ein neues exzentrisches Fixationszentrum ausbildet. Die Schädigung des zentralen Fixationsvermögens hat einen wesentlichen Einfluss auf die Nutzbarkeit der zentralen Netzhaut.

Der Begriff exzentrische Fixation wird in der Literatur kontrovers diskutiert.

So sprechen z.B. Moller et al. von fovealer Fixation, wenn alle Fixationspunkte nicht weiter als  $1^\circ$  vom Zentrum der avaskulären Zone entfernt sind. Ab einer Entfernung von  $3^\circ$  klassifizieren sie die Fixation als exzentrisch.

Tezel et al. werten das Fixationsverhalten als exzentrisch bzw. alternierend, wenn die Fixationspunkte um mehr als  $1,5^\circ$  voneinander abweichen. [11]

Verschiedene Studien haben mit Hilfe des Scanning Laser Ophthalmoskop ermittelt, dass die meisten Patienten, die unter einem bilateralen absoluten Gesichtsfeldausfall, der die komplette Fovea betrifft, leiden, einen „Preferred Retinal Locus“ (PRL), manchmal auch „Pseudo-Fovea“ genannt, entwickeln. Diese neue Fixationsstelle übernimmt von der nicht mehr funktionstüchtigen Fovea die Aufgabe der Erkundung visueller Details. [20]

Die Betroffenen sind sich ihres okulomotorischen Verhaltens meistens nicht bewusst oder verstehen es nicht.[15] Es ist deshalb sehr wichtig, dass man ihnen die Art ihrer Sehbehinderung erklärt und ihnen hilft, ihr verbliebenes Sehvermögen so effizient wie möglich zu nutzen.

### 4.3 Lage der PRL

Wo sich die PRL ausbildet, lässt sich schwer voraussagen. Man erwartet einen möglichst wenig pathologisch veränderten, foveanahen Netzhautort, da Auflösungsvermögen und Visus mit zunehmender Exzentrizität abnehmen. Die Wahl wird aber nicht nur durch den Visus beeinflusst. Einige Komponenten werden bis heute noch nicht ausreichend verstanden. Zur Zeit ist bekannt, dass neben dem Visus, das vorhandene Gesichtsfeld, die Form und Größe des Skotoms, die Entfernung der Skotomgrenzen von der Fovea, die Korrespondenz im binokularen Sehen und die topographischen Unterschiede der visuellen Aufmerksamkeit die Wahl der PRL beeinflussen. [9]

Eine Studie über das Fixationsverhalten bei Morbus Stargardt ergab, dass die Entwicklung der PRL bei dieser Erkrankung in drei Stufen abläuft. Mit der ersten Funktionsminderung der Fovea wird zunächst die Fixationsstabilität um die Fovea vermindert. Danach kommt es zu einem Wechsel zwischen zwei verschiedenen Fixationsorten. Der Wechsel findet zwischen einem zentralen und einem exzentrischen Fixationsort, der genau am Rande des Skotoms liegt, statt. Im Endstadium ist die Fixation außerhalb des Zentralskotoms lokalisiert. [45]

Die Daten der Studie von Fletcher und Schuchard [15] unterstützen die Theorie, dass das visuelle System von sich aus eine oder mehrere PRL wählt. Sie fanden heraus, dass 84 % der von ihnen untersuchten 1339 Augen eine PRL entwickelt hatten. Bei den meisten Augen, die keine PRL ausgeprägt hatten, lagen sehr große zentrale Skotome vor, wobei das andere Auge eine Fixationsstelle innerhalb der zentralen 5 ° besaß.

Eine Studie von Mehlhorn [38] ergab, dass die PRL bei Optikuskrankungen zu 67,5% am Skotomrand lag, der Stelle mit der höchsten Empfindlichkeit. Bei Retinaerkrankungen waren die Fixationspunkte zu 52,5% (bei photopischen Lichtverhältnissen) am Skotomrand zu finden. Die Fixationspunkte lagen möglichst dicht an der Foveola, bei relativen Skotomen auch im Skotombereich selbst.

Ein weiteres Ergebnis dieser Studie war, dass ab 2° Exzentrizität des Fixationspunktes bei Retinaerkrankungen und 3° Exzentrizität bei Optikuserkrankungen ein Visus besser als 0,3 nicht mehr auftrat. Dies steht im Einklang mit der Wertheim'schen Kurve. Der Isopter für den Visus 0,3 verläuft vom Gesichtsfeldzentrum entfernt 3° nach oben und unten, 3,5 ° nach temporal und 5,5 ° nach nasal. Je größer die Entfernung des Fixationspunktes von der Foveola und je niedriger das retinale Empfindlichkeitsniveau des Fixationspunktes sind, desto schlechter ist der Visus.

Studien von Guez (1992) und Mehlhorn (1989) fanden heraus, dass sich der Visus nicht immer proportional zur Exzentrizität der „Pseudo-Fovea“ verhält. Eine mögliche Erklärung dafür könnte sein, dass die Betroffenen einen Netzhautort nutzen, der nicht gänzlich gesund ist, aber eine geringst mögliche Exzentrizität besitzt. Diese Netzhautstelle wird aber eher genutzt als eine peripherere Netzhautstelle, die ein höheres Auflösungsvermögen ermöglicht. [38, 20, 12]

In früheren Studien wie zum Beispiel von Timberlake [51] wurde davon ausgegangen, dass Patienten, die sich gut an ihr Zentralskotom angepasst haben, nur eine Netzhautstelle als „Pseudofovea“ nutzen, welche relativ stabil und genau definiert ist. Diese PRL stellt einen Kompromiss zwischen dem höchstmöglichen Auflösungsvermögen und dem größtmöglichen Sehfeld dar. Man ging davon aus, dass die Ausbildung nur einer PRL im Zusammenhang steht mit dem Wechsel des retinomotorischen Zentrums von der nicht funktionsfähigen Fovea hinzu der neu entwickelten PRL. White und Bedell [58] zeigten, dass ca. ein Drittel ihrer Patienten ein gut angepasstes okulomotorisches Verhalten entwickelt hatten.

#### **4.4 Lesen mit einem Zentralskotom**

Verschiedene Studien, die in den letzten Jahren zur Erforschung des Leseverhaltens bei Vorliegen eines Zentralskotoms durchgeführt wurden, ergaben, dass manche Testpersonen mehr als nur eine PRL während des Lesens nutzten. Dabei bot eine

PRL ein besseres Auflösungsvermögen und die andere ein brauchbareres Sehfeld.[9]

Ein Beispiel dafür ist eine von Duret durchgeführte Studie, in der die kombinierte Nutzung mehrerer PRL's zum Lesen einzelner Wörter untersucht wurde. Dabei fand er heraus, dass der Gebrauch einer PRL von der Größe des Wortes und von der Wortlänge abhängig war. Die untersuchten Patienten nutzten eine PRL, um das Wort grob zu überblicken, gebrauchten dann aber andere Netzhautstellen zum Lesen, die ein höheres Auflösungsvermögen boten. [10]

Der Einfluss der Lage der PRL auf die Lesefähigkeit der Betroffenen wurde und wird kontrovers diskutiert. Sunness et al [50] beschrieben, dass bei den Testpersonen mit einer geographischen Atrophie sich das Skotom meistens rechts von der Fixation befand. In der Studie von Fletcher und Schuchard [15] bildete sich die PRL in 39 % unter dem Skotom, in 34% links vom Skotom, in 20 % rechts vom Skotom und in 7% oberhalb des Skotoms aus, vorausgesetzt die PRL besaß nur eine Grenze zum Skotom.

Mehrere Studien kamen zu dem Resultat, dass bei der altersabhängigen Makuladegeneration, Makulalöchern und Morbus Stargardt sich die exzentrische Fixation meistens so ausgeprägt hatte, dass das Skotom sich oberhalb der Fixation im Gesichtsfeld befand. [15, 20, 45, 50, 51]

Die PRL bildet sich meistens in der unteren Hälfte oder rechten Hälfte des Gesichtsfeldes aus. Dabei bleibt entweder das untere oder linke Gesichtsfeld frei von Defekten.

Bei der Nutzung der oberen Hemiretina wird das Skotom und automatisch auch der blinde Fleck im Gesichtsfeld nach oben verlagert. Dadurch bleibt das untere Gesichtsfeld frei von Defekten, was die Mobilität so wenig wie möglich einschränkt. Andere Gründe wurden durch die Elektroretinographie aufgedeckt. Die obere Hemiretina besitzt eine höhere Empfindlichkeit. Das heißt, die Lichtunterschiedsempfindlichkeit ist geringer. Die Kontrastempfindlichkeit, die Zapfendichte und das Auflösungsvermögen sind dagegen höher.

Deshalb gehen mehrere Forschungsgruppen davon aus, dass die beste Lesestrategie wäre, den Blick leicht nach oben zu richten, so dass das zu lesende Wort sich unter dem Skotom im Gesichtsfeld befindet. Auf diese Weise wäre ein ausreichend großes horizontales Gesichtsfeld vorhanden, welches zum Lesen notwendig ist. Die Betroffenen können so die zu lesende Zeile gut überblicken und die nächste Zeile finden. [42]

Die Erkenntnis, dass sich die Skotome häufiger rechts von der PRL befinden als links, erscheint verwunderlich, da die Testpersonen von links nach rechts lasen und schrieben. Studien, die mit Normalsichtigen durchgeführt wurden, ergaben, dass man textliche Informationen vom rechten Gesichtsfeld effizienter und schneller verarbeiten kann als vom linken Gesichtsfeld.

Skotome, die sich rechts von der PRL befinden, neigen dazu das Ende des fixierten Wortes oder den Beginn des nächsten Wortes zu verdecken. Damit erschweren sie dem Betroffenen das Ende einer Zeile zu finden und die darauffolgenden geeigneten Augenbewegungen durchzuführen. Skotome links von der PRL erschweren dagegen die Erkennung des Anfangs einer Zeile. [14, 20]

Verschieden Studien haben versucht dieses Phänomen zu erklären. Guez kam zu dem Schluss, dass ein wichtiger Aspekt des Lesens ist, das Auge richtig in der Zeile zu positionieren. Dafür muss die linke Gesichtshälfte frei von Defekten bleiben. Nur so kann der Leser wissen, ob er eine Augenbewegung mit der geeigneten Amplitude vollzogen hat. [20]

Vergrößernde Sehhilfen werden genutzt um den herabgesetzten Visus und die herabgesetzte Kontrastempfindlichkeit zu kompensieren. Low Vision Patienten mit intaktem zentralem Gesichtsfeld können mit vergrößernden Sehhilfen normale Lesegeschwindigkeiten erreichen. Bei Verlust des zentralen Gesichtsfeldes ist das nicht mehr möglich. Eine Studie durchgeführt von Pesudovs [43] ergab, dass Patienten, die unter einer Erkrankung der Makula litten, eine signifikant langsamere

Lesegeschwindigkeit zeigten als Patienten, die am Katarakt erkrankt waren. Pesudovs stellte fest, dass eine Überprüfung der Lesegeschwindigkeit eindeutig eine Differenzierung zwischen Makulaerkrankten und Katarakterkrankten ermöglicht.

Die Studie von Sunness et al [50] ergab, dass die lineare Ausdehnung des Skotoms der entscheidende Faktor für die maximale Lesegeschwindigkeit bei Vorliegen einer geographischen Atrophie war. Fletcher et al [16] fanden heraus, dass der Abstand der PRL vom Skotom ebenfalls Einfluss nimmt. Wenn sich das Skotom innerhalb von  $2^\circ$  an der PRL befand, war die Lesegeschwindigkeit stark reduziert.

Bei Verlust des zentralen Gesichtsfeldes kann die Lesegeschwindigkeit auch nicht durch die Vergrößerung der Schrift an die der „Normalsichtigen“ angeglichen werden. [13]

Die von Nilsson et al durchgeführten Untersuchungen haben ergeben, dass die Lesegeschwindigkeit nach intensivem Training der exzentrischen Fixation verbessert werden konnte. [42] Die Frage, die sich dabei stellt, ist, ob die Verbesserung durch einen Wechsel der genutzten Netzhautstelle hervorgerufen wurde, oder ob der psychologische Nutzen des Trainings und des Bewusstwerdens neuer visueller Strategien dafür verantwortlich waren.

Zur Zeit ist noch nicht geklärt, ob zusätzliche PRL dauerhaft entwickelt werden können, um effizientere Lesestrategien zu entwickeln. Ob diese trainierten Fixationsorte für die Betroffenen effektiv nutzbar sind, verglichen mit der natürlich entstandenen PRL, ist noch nicht bewiesen. [16]

Ein weiterer wichtiger Grund für die herabgesetzte Lesegeschwindigkeit ist die reduzierte Fähigkeit, die Augenbewegungen während des Lesens zu kontrollieren.

Betroffene mit zentralen Gesichtsfeldausfällen lesen in der Regel ungenau. Sie verpassen das Ende eines Wortes und den Anfang des nächsten. Oft überspringen sie auch eine Zeile, das Verständnis des Gelesenen ist ebenfalls reduziert.

Der Verlust der Fovea führt zu einem Anstieg der Sakkaden pro gelesener Zeile. Die Fixationsdauer ist irregulär und länger als bei „Normalsichtigen“. Die Betroffenen

verlieren das Wort horizontal so wie vertikal während des Lesens, was dazu führt, dass das Wort mehrmals gelesen werden muss. Es finden Rücksprünge und vertikale Bewegungen innerhalb einer Zeile statt. [25, 28]

Die Anpassung des okulomotorischen Systems an die exzentrische Fixation ist eine Voraussetzung für das Lesen. Die Fähigkeit effiziente und effektive Augenbewegungen zu vollziehen, wird als die schwierigste Komponente des Sehens betrachtet. Die Initiierung der Fixation, die Fixationsstabilität, die Aufrechterhaltung der Fixation und sakkadische Augenbewegungen gehören zu den grundlegenden Augenbewegungen des visuellen Systems. Sie sind messbare Parameter, mit denen die Qualität der PRL beschrieben werden kann. Das bedeutet, die PRL sollte in der Lage sein, die Fixation zu steuern, das angeblickte Objekt stabil in einem Netzhautgebiet zu halten, sich bewegende Objekte zu bemerken und sakkadische Augenbewegungen durchzuführen. [10, 16]

Die Mehrzahl der Low Vision Patienten leiden unter einem Zentralskotom, wobei die Ausprägung stark variiert. Es darf nicht davon ausgehen werden, dass alle Zentralskotome rund sind, sich gleichmäßig um die Fovea konzentrieren und sich die PRL an einem Rand des Skotoms befindet.

Fletcher et al [15] fanden z.B. heraus, dass nur 39,7 % der von ihnen untersuchten Augen, eine PRL mit nur einer Grenze zum Skotom besaßen. 17,4 % hatten eine PRL entwickelt, die von einem Ringskotom umgeben war. Diese Testpersonen hatten größere Sehprobleme als Testpersonen mit dem selben Visus, die aber kein Ringskotom aufwiesen. Das Ringskotom beeinträchtigte die Lesefähigkeit dann stark, wenn das Netzhautareal innerhalb des Ringskotoms zu klein war, um ein effektives Lesen zu gewährleisten.

Visuelle Informationen aus dem zentralen und peripheren Gesichtsfeld werden im Gehirn unterschiedlich verarbeitet. Wenn die periphere Netzhaut zum Lesen genutzt wird, kommt es auch deshalb zu einer herabgesetzten Lesefähigkeit.

## 4.5 Multiple PRL

Unterschiedliche Fixationsanforderungen z.B. unterschiedliche Wortlängen führten in mehreren Studien zu einem Wechsel des Fixationsareals. Einige Testpersonen nutzten eine Netzhautstelle, die innerhalb des Skotoms lag, um kurze Wörter zu erkennen. Eine andere Netzhautstelle, die außerhalb des Skotoms lag, diente der Erkennung längerer Wörter. In diesen Fällen kann man davon ausgehen, dass die Degeneration der Makula nicht vollständig war. Es müssen teilweise funktionsfähige Netzhautstellen innerhalb der Läsion vorhanden gewesen sein. Die Verschiebung der Fixation fand nur dann statt, wenn das funktionsfähige Gebiet innerhalb der Läsion zu klein für das Wort war. [20, 45]

Schuchard und Lei [33] untersuchten in ihrer Studie Probanden mit absoluten und relativen Zentralskotomen in Hinblick auf ihr Fixationsverhalten und stellten fest, dass manche, die ein relatives Zentralskotom besaßen, zwei PRL's entwickelt hatten, die sie bei unterschiedlichen Lichtverhältnissen nutzten. Das heißt, die PRL verlagerte sich zwischen zwei Netzhautstellen abhängig von der Leuchtdichte der Stimuli. Wenn eine hohe Helligkeit gegeben war, wurde die PRL, die sich für hohe Leuchtdichten entwickelt hatte, bevorzugt. Diese ergab in der Regel einen höheren Visus und eine bessere Fixationsstabilität. Diese Netzhautstelle befand sich innerhalb des relativen Zentralskotoms, normalerweise in der Fovea oder kurz außerhalb des absoluten Zentralskotoms. Im Gegensatz dazu befand sich die Netzhautstelle für geringe Leuchtdichten in einem relativ gesunden Bereich der Retina, welcher sich an das relative Skotom anschloss. Der Wechsel der PRL war nicht mit dem Wechsel von Zapfen auf Stäbchen verbunden, sondern mit der Funktionsfähigkeit der Zapfen. Die relativ gesunden Zapfen außerhalb des relativen Skotoms hatten eine bessere Lichtsensibilität als die teilweise geschädigten Zapfen im Bereich des relativen Skotoms, welche schlecht bei geringen Leuchtdichten funktionierten.

Schuchard und Lei nahmen an, dass unter guten Lichtbedingungen die PRL innerhalb des relativen Skotoms genutzt wird, aber bei nicht gut beleuchteten Umgebungen, wie zum Beispiel einem Restaurant, sich die PRL außerhalb des

relativen Skotoms durchsetzt. Dies wiederum führt zu einer Reduzierung der Sehfunktionen. Für diese Personen ist eine gute Umgebungsleuchtdichte besonders wichtig.

#### **4.6 Aktuelle Studien über die exzentrische Fixation**

Die exzentrische Fixation wurde in den bisher durchgeführten Studien unter monokularen Voraussetzungen untersucht. Dabei sind binokulare Gesichtsfelder informativer, da diese eher dem alltäglichen Sehen entsprechen. Eine kürzlich von Schuchard durchgeführte Studie [49], bei der sowohl die monokularen als auch die binokularen Gesichtsfelder gemessen wurden, ergab, dass das binokulare Gesichtsfeld nicht einfach aus den monokular gemessenen Gesichtsfeldern berechnet werden kann. Als Ursache gab Schuchard an, dass nicht vorhersehbar war, wie sich beide Augen unter binokularen Bedingungen tatsächlich zueinander ausrichteten.

Ein wichtiger Punkt, der in den Blickpunkt des Interesses gerückt ist und durch Kabanarou et al [30] zur Zeit untersucht wird, ist, ob die monokular ermittelte PRL von den Betroffenen ebenfalls unter binokularen Sehbedingungen genutzt wird.

Die ersten Ergebnisse der Studie weisen daraufhin, dass unterschiedliche Netzhautstellen zur Fixation unter monokularen und binokularen Bedingungen genutzt werden.

Wenn der Visus in beiden Augen ähnlich war und die Zentralskotome relativ gut übereinstimmten, schien eine Verschiebung der PRL in beiden Augen aufzutreten. In den Fällen, bei denen der Visus in beiden Augen unterschiedlich war und die Zentralskotome in Größe und Intensität voneinander abwichen, war es dagegen wahrscheinlicher, dass nur das Folgeauge eine Verschiebung aufwies.

Kabanarou et al gingen davon aus, dass eine Verschiebung in beiden Augen dazu führte, dass die PRL's auf korrespondierende Netzhautstellen fallen, um das binokulare Sehen so gut wie möglich zu erhalten. Die bisher getesteten Probanden zeigten nichts desto weniger eine zentrale Hemmung im schlechteren Auge.

Wenn die Verschiebung nur im Folgeauge auftrat, schien es so zu sein, dass es nicht

nur zu einer zentralen sondern zu einer kompletten Hemmung des schlechteren Auges kam. Um diese Beobachtungen zu verifizieren, wird zur Zeit eine größere Probandengruppe untersucht.

Die Perimetrie des zentralen Gesichtsfeldes und die Ermittlung der PRL geben wichtige Informationen über den funktionellen Status der zentralen Netzhaut.

Die Lokalisation des neuen bevorzugten retinalen Fixationsareals und dessen sensorische und motorische Anpassung ist von Bedeutung für Therapie und Rehabilitation. Bei einer geplanten Lasertherapie sollten die bevorzugten exzentrischen Fixationsorte möglichst geschont werden und eine ausreichende Größe des neuen Lesegesichtsfeldes erhalten bleiben. Weiterhin sollte eine ruhige exzentrische Fixation bei der Rehabilitation unterstützt werden, dagegen wechselnde Fixationsorte sowie eine unruhige Fixation abgebaut werden.

Eine der wichtigsten Aufgaben der Rehabilitation ist es dem Betroffenen zu helfen, sein verbliebenes Sehvermögen so effektiv wie möglich zu nutzen. Grundlage dafür ist eine bewusste Nutzung der exzentrischen Fixation.

## 5. Perimetrie

### 5.1 Einführung

Bereits 1856 hat Graefe festgestellt: „Klagt ein Patient über Abnahme der Sehkraft, so wendet man sich gewöhnlich zunächst an die Feststellung der Sehschärfe.... Mit der Bestimmung der centralen Sehschärfe, welche wir auf diese Weise erreichen, sind wir noch keineswegs über das Sehvermögen des Patienten im Reinen. Es beruht der zweite durchaus ebenso wichtige Theil der Untersuchung in der Prüfung des Gesichtsfeldes,... [19]

Die Perimetrie misst die Ausdehnung des Gesichtsfeldes. Unter dem Begriff „Gesichtsfeld“ wird die Gesamtheit der optischen und sensorischen Reize verstanden, die bei fixierter Blick-, Kopf- und Rumpfstellung auf der Netzhaut abgebildet, von dort zur Gehirnrinde geleitet und wahrgenommen werden. Unterschieden werden das monokulare und binokulare bzw. das zentrale und periphere Gesichtsfeld. Das zentrale Gesichtsfeld ist eine Funktion der Zapfen. Das periphere Gesichtsfeld ist dagegen eher eine Funktion der Stäbchen.

Die monokularen Gesichtsfeldgrenzen, gemessen in Grad vom Fixationspunkt aus gesehen, sind:

60° nach superior, 75° nach inferior

100° nach temporal, 60° nach nasal.

Das binokulare Gesamtgesichtsfeld hat einen horizontalen Durchmesser von etwa 180° bis 220° und die mittleren Teile werden mit den Netzhäuten beider Augen gesehen. Hingegen wird die etwa 30° breite Randzone („temporaler Halbmond“) von jeder Seite nur monokular wahrgenommen.

### 5.1.1 Die Lichtunterschiedsempfindlichkeit und die psychophysiologischen Gesetzmäßigkeiten des Lichtsinns

Die Perimetrie gibt Auskunft über die Funktionstüchtigkeit der Netzhaut, der Sehbahnen und des Sehentrums. Die klinisch übliche Perimetrie prüft die Verteilung der Lichtunterschiedsempfindlichkeit (LUE) im Gesichtsfeld. Die Lichtunterschiedsempfindlichkeit beschreibt die Fähigkeit des Auges, einen Helligkeitsunterschied zwischen einem Stimulus und dessen Hintergrund wahrzunehmen. Man verwendet deswegen einen gleichmäßig hellen Hintergrund, auf den Stimuli projiziert werden.

Die Lichtunterschiedsempfindlichkeit ist die fundamentale Sehfunktion des visuellen Systems. Sie ist weitestgehend die Voraussetzung für alle anderen Sehfunktionen.[18]

Entsprechend dem Fechnerschen Gesetz ist die Helligkeitsempfindung proportional zum Logarithmus der physikalischen oder der objektiven Strahlenintensität. Dieser Zusammenhang ist bei den photometrischen Größen, wie Lumen oder Apostilb, noch nicht berücksichtigt. Es wird deshalb in der Praxis eine logarithmisches Helligkeitsmaß angewandt. [35]

Bei einer gegebenen Stimulusleuchtdichte, ausgedrückt in (x) Apostilb, wird die LUE, ausgedrückt in (y) Dezibel [dB], wie folgt berechnet:

$$(y) \text{ dB} = 10 \times \log \frac{1000 \text{ asb}}{(x) \text{ asb}}$$

Die Verteilung der Photorezeptoren sowie das Verhältnis von Ganglienzellen zu Rezeptoren in der Netzhaut sind für die Ortsabhängigkeit der Lichtunterschiedsempfindlichkeit verantwortlich.

Jeder Punkt des Gesichtsfeldes besitzt eine bestimmte Reizschwelle, definiert durch den Stimulus, der gerade eben an diesem Ort sichtbar ist. Die Perimetrie bestimmt diese Reizschwelle sowohl an beliebig ausgewählten Punkten als auch an den Außengrenzen des Gesichtsfeldes. Durch die Perimetrie ist für jeden Ort des

Gesichtsfeldes eine unterschiedliche Empfindlichkeit nachweisbar. Diese gruppieren sich um den Punkt der höchsten Auflösung, anatomisch der Fovea entsprechend, so dass man von einem „Gesichtsfeldberg“ sprechen kann.

Dies gilt nur unter photopischen Bedingungen. Mit abnehmender Adaptationsleuchtdichte, also beim Übergang vom photopischen zum skotopischen Bereich, verringert sich die Vorzugsstellung der Fovea zusehends, bis im Zustand der völligen Dunkeladaptation ein funktionelles Zentralskotom entsteht. [3]

Es gibt einige elementare psychophysische Gesetze, die in der Perimetrie Anwendung finden und wichtig sind für das Verständnis der perimetrischen Ergebnisse. Dazu gehört zum Beispiel das Webersche Gesetz, welches besagt, dass das Inkrement, welches für eine Wahrnehmung einer Lichtänderung notwendig ist, in einem großen Bereich proportional zur umgebenden Lichtintensität ist. Das bedeutet, dass die Lichtunterschiedsempfindlichkeit durch den Quotienten von Stimulushelligkeit zu Hintergrundhelligkeit bestimmt ist.

Weitere sehr wichtige Gesetzmäßigkeiten sind die räumliche und die zeitliche Summation. Wird die Fläche eines Schwellenstimulus vergrößert, so wird die benötigte Leuchtdichte kleiner. Das heißt, dass der Stimulus über eine bestimmte retinale Fläche aufsummiert wird. Dieses Phänomen ist in der Peripherie stärker ausgeprägt als im Zentrum. Ein ähnlicher Zusammenhang besteht zwischen Stimulusexpositionszeit und der benötigten Stimulusleuchtdichte. [32]

Die Konstanz der spektralen Zusammensetzung des verwendeten Lichtes ist für die Perimetrie sehr wichtig. Ändert sich die Zusammensetzung der Wellenlängen von Stimulus- und Hintergrundlicht, so wird der Helligkeitseindruck verändert. Dies wiederum bedeutet, dass man ein anderes Gesichtsfeldresultat erhält. [18]

### **5.1.2 Definition der visuellen Reizschwelle**

Um die Lichtunterschiedsempfindlichkeit an einem bestimmten Punkt des Gesichtsfeldes sicher bestimmen zu können, sind folgende Faktoren zu

berücksichtigen:

- Die Größe des Stimulus
- Der Abstand zwischen Stimulus und Auge des Geprüften
- Die absolute Helligkeit des Stimulus
- Die Hintergrundleuchtdichte
- Die Farbe des Stimulus
- Die Bewegungsgeschwindigkeit des Stimulus bei der kinetischen Perimetrie
- Die Präsentationsdauer des Stimulus bei der statischen Perimetrie
- Die Refraktion der Testperson
- Pupillenweite
- Die Aufmerksamkeit der Testperson. [3]

### **5.1.3 Störfaktoren und Artefakte**

Perimetrische Befunde können durch verschiedene Störfaktoren und Artefakte verfälscht werden. Zur Vermeidung von Fehlschlüssen gehören Kenntnisse über diese Störfaktoren. Dazu gehören:

- inadäquate Patienteneinweisung
- inadäquate Patientenüberwachung
- unaufmerksame und unkooperative Patienten, was zu Fixaktionsverlusten und zu nicht vertrauenswürdigen Antworten führt
- Lerneffekte
- ungeeignete Stimulusauswahl (Größe, Helligkeit) und ungeeignete Fixationsmarke
- Fehlrefraktion, prismatische Effekte von Korrekturgläsern, Glasrandartefakte
- Lidartefakte oder stark hervorstehende Augenbrauen
- Zu kleine Pupillenweite (weniger als 2mm)
- Transmission der brechenden Medien. [3, 18, 32]

Um die Verlässlichkeit der Untersuchungsergebnisse zu sichern, müssen bestimmte Kontrollen parallel zum Untersuchungsablauf stattfinden. Der Proband darf nicht von der Fixationsmarke im Zentrum des Perimeters abweichen. Nur der für eine bestimmte Pupillenposition wahrgenommene Ausschnitt der Umwelt wird als Gesichtsfeld definiert. Durch eine Bewegung der Pupille wird dieser wahrgenommene Ausschnitt erweitert, der dann aber nicht mehr als Gesichtsfeld bezeichnet werden kann. Falls die Pupille sich doch bewegt, so muss der aktuelle Prüfpunkt als ungültig gewertet werden. Die Position der Pupille muss also bei jeder Untersuchung überwacht werden. Die Konzentration des Probanden und damit die Plausibilität der Antworten müssen während der Untersuchung ebenfalls überwacht werden.

#### **5.1.4 Vergleich der statischen und kinetischen Prüfmethode**

Zwei Untersuchungsmethoden finden Verwendung, die statische und die kinetische Prüfmethode. Die heute übliche Perimetrie wird manuell fast ausschließlich kinetisch durchgeführt. Die computergesteuerte automatische Perimetrie bedient sich überwiegend des statischen Messprinzips, wobei einige Automaten zusätzlich auch das kinetische Verfahren nutzen können.

Aus physiologischen Gründen erhält man für statisch (fest) und kinetisch (bewegt) dargebotene Stimuli unterschiedliche Ergebnisse bei ein und der selben Testperson unter gleichen Nebenbedingungen (Intensität, Darbietungsdauer, Stimulusgröße). Bewegte Stimuli haben physiologischerweise einen höheren Reizwert als stehende Testmarken. Der Verlauf der Lichtunterschiedsempfindlichkeit mit einem relativ flachen Plateau im parazentralen Bereich und der mittleren Perimetrie und einem steileren Verlauf in der äußeren Peripherie verdeutlicht, dass das statische Verfahren im zentralen Gesichtsfeld genauere Ergebnisse liefert, umgekehrt das kinetische Verfahren in der äußeren Peripherie überlegen ist.

Bei tiefen lokalisierten Skotomen bietet das kinetische Messprinzip mit „horizontaler“ Bewegungsrichtung eine wesentlich schärfere Schwelle als das

statische Messprinzip. [32]

Die Zweckbestimmung der statischen Perimetrie ist nicht die Größenerfassung von Skotomen, sondern die Beurteilung der Lichtunterschiedsempfindlichkeit der Netzhaut im Skotom bzw. in angrenzenden Bereichen.

So wird ermöglicht, dass erste, noch dezente pathologische Veränderungen erfasst werden können, selbst dann, wenn die Sehfunktion dieses Areals noch weitgehend erhalten ist.

Bei einem Vergleich der kinetischen und der statischen Perimetrie fällt auf, dass bei unterschiedlichen Krankheitsbildern eine Differenz der Gesichtsfeldresultate auftritt. Dies wird als stato-kinetische Dissoziation bezeichnet. Die Gründe liegen dabei einerseits in den unterschiedlichen Untersuchungsansätzen und andererseits in den pathophysiologischen Gegebenheiten der einzelnen Erkrankungen. Pathologische Veränderungen auf verschiedenen Ebenen des visuellen Systems führen zu einer unterschiedlichen Wahrnehmung stehender und bewegter Stimuli.

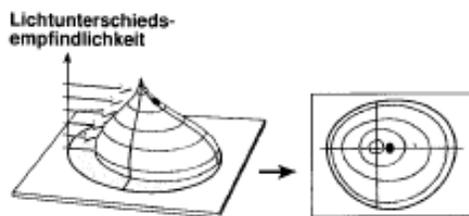
In einer Studie von Beitzinger [3] wurde festgestellt, dass bei unvollständig geschädigten Strukturen generell eine Differenz der kinetischen und statischen Befunde auftrat. Nur wenn eine komplette, anatomisch vollständige Läsion vorhanden war, kam es zu keiner stato-kinetischen Dissoziation.

Auch das aktive "Ausfüllen" des Gehirns kann zur stato-kinetischen Dissoziation beitragen. Als Ursache wird vermutet, dass der aktive "Ausfüllungsprozess" des Gehirns durch die Ermittlung der Schwellenwerte einzelner Punkte besser aufgedeckt werden kann als durch das Ausmessen der Isoptere. [60]

Beide Verfahren besitzen unterschiedliche diagnostische Spektren. Für die Erfassung glaukomatöser Frühausfälle wird die statische Perimetrie als die überlegende Methode angesehen. Die kinetische Perimetrie ermöglicht dagegen eine gute Detektion des subjektiv wahrgenommenen Gesichtsfeldes. Zur genauen Beurteilung der Gesichtsfeldsituation sind beide Methoden erforderlich. Sie stehen also in keiner Konkurrenz zu einander.

## 5.2 Kinetische Perimetrie

In der kinetischen Perimetrie wird zu einer konstanten Hintergrundleuchtdichte ein zusätzlicher Stimulus von konstanter Helligkeit in Richtung des Fixationszentrums bewegt und der Ort der ersten Wahrnehmung registriert. Der Stimulus wird aus dem unterschwelligem (nicht sehenden) Bereich des Gesichtsfeldes auf den überschwelligen (sehenden) Bereich zu bewegt. Mit der kinetischen Perimetrie erfolgt ein horizontaler Schnitt durch das Empfindlichkeitsgefälle der Netzhaut. Die



**Abbildung 6: Die kinetische Perimetrie [54]**

wobei jeder Isopter eine bestimmte Empfindlichkeit repräsentiert, ähnlich den Höhenlinien eines Berges. Bei diesem Verfahren kann besonders das Orientierungsvermögen geprüft werden und dies vor allem auch bei erheblich reduziertem Visus.

Die kinetische Perimetrie besitzt trotz der weiten Verbreitung der automatischen statischen Perimetrie weiterhin eine große Bedeutung. Hauptsächlich wird sie bei Gutachten (Versicherungsgutachten, Führerscheinbegutachtungen, Blindengeld usw.), bei neuroophthalmologischen Gesichtsfelddefekten sowie bei Patienten mit reduzierter Kooperation oder mit sehr eingeschränkten Gesichtsfeldern eingesetzt.

Für die Entwicklung der modernen Perimetrie war die im wesentlichen auf Goldmann zurückgehende Forderung, dass eine zuverlässige perimetrische Messung einen definierten Adaptionszustand erfordert, von zentraler Bedeutung. Das Prinzip des Goldmann-Perimeters beruht auf einer gleichmäßig ausgeleuchteten Halbkugel

benutzten Testmarken können in ihrer Intensität und Größe variiert werden, so dass sowohl die relativ unempfindliche Gesichtsfeldperipherie als auch das hochempfindliche zentrale Gesichtsfeld erfasst werden können. Verbindet man die Lokalisationen der wahrgenommenen Stimuli gleicher physikalischer Eigenschaften, so erhält man Isoptere,

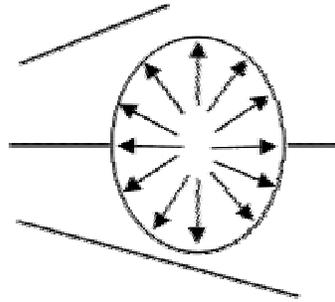
als Hintergrund und der Projektion von Testmarken definierter Größe und Helligkeit. Nur auf diese Weise ist die Untersuchung standardisierbar, so dass zu verschiedenen Zeiten aufgenommen Gesichtsfelder vergleichbar und für Verlaufskontrollen geeignet sind.

Die von Goldmann gestellten Anforderungen an einen Perimeter sind folgende:

1. Konstante Ausleuchtung des Perimeterhintergrundes ( $10 \text{ cd/mm}^2$ )
2. Konstanthaltung der Verhältnisse bezüglich der Helligkeit der Testmarke zur Helligkeit des Hintergrundes
3. Entfernung des Auges zur Perimeterfläche musste konstant sein
4. Die Bewegung der Textmarke, senkrecht auf die Grenze des Skotoms und des Isopters, musste möglich sein
5. Selbstregistrierendes Perimeter mit großem Schema
6. Möglichkeit der Fixationskontrolle
7. adäquate Korrektur der Refraktion: Addition zur Fernkorrektur innerhalb der zentralen  $35^\circ$
8. Der Untersuchte muss an die Hintergrundhelligkeit adaptiert sein.[3, 18]

Das Goldmann-Perimeter dient auch als Vorbild für die Abstufung der Stimulusgröße. Es besitzt fünf verschiedene Reizgrößen, deren Durchmesser von Stufe zu Stufe verdoppelt wird. Der Sehwinkel steigt dabei von  $0,11^\circ$  bis auf  $1,72^\circ$ .

In der kinetischen Perimetrie hat die Reaktionszeit des Patienten einen wesentlichen Einfluss auf die Position der Isoptere. Es ist deshalb wichtig, eine möglichst einheitliche Methodik zu nutzen. Die Perimetrie sollte zum Beispiel immer aus dem Skotom heraus erfolgen, das heißt, die Prüfmarke wird langsam bis zum Erkennen aus dem Skotom herausbewegt (Abbildung 7).



**Abbildung 7: Vorgehensweise bei der kinetischen Perimetrie**

In der manuellen kinetischen Perimetrie ist eine standardisierte Beurteilung der Reaktionszeit nicht möglich, da sie individuell sehr unterschiedlich und von verschiedenen Stimulus-bezogenen Faktoren abhängig ist. Dazu zählen die Stimulusleuchtdichte und die retinale Exzentrizität des Stimulus (mit  $1,8 \text{ ms/}^\circ$ ).

Die manuelle kinetische Perimetrie ist nicht nur eine subjektive Methode in bezug auf den Patienten sondern auch in bezug auf den Untersucher.

Die Geschwindigkeit der Stimulusdarbietung wird durch den Untersucher kontrolliert. Bei der manuellen kinetischen Perimetrie kann die Prüfungsgeschwindigkeit bei verschiedenen Untersuchern nicht konstant gehalten werden. Goldmann empfiehlt  $1\text{--}2^\circ/\text{s}$  ebenso wie Lachenmayr und Fankhauser  $2^\circ/\text{s}$ . Nach Gloor prüfen aber viele Untersucher in der Peripherie mit  $3\text{--}5^\circ/\text{s}$ . Schnell bewegte Stimuli werden schneller erkannt als langsam bewegte Stimuli.

Wabbels et al [56] untersuchten die Auswirkungen unterschiedlicher Prüfungsgeschwindigkeiten. Nach den Ergebnissen dieser Studie wird für die zentralen Isoptere sehr deutlich, dass eine konstante Testgeschwindigkeit von  $2^\circ/\text{s}$  die besten Ergebnisse bringt.

Die manuelle kinetische Perimetrie ist im Vergleich zur automatischen statischen Perimetrie nicht nur schwieriger zu standardisieren sondern auch schlechter zu reproduzieren. Die Automatisierung der kinetischen Perimetrie könnte die Fehlerquelle, die der Perimetrist darstellt, eliminieren und ebenfalls Stimulus-

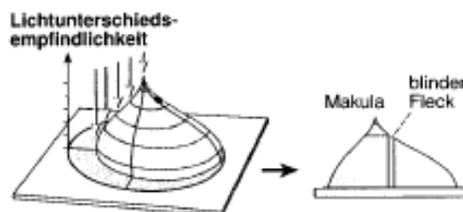
bezogene und Testperson-bezogene Variablen korrigieren.

Mehlhorn [38] fand heraus, dass sich die kinetische Perimetrie zur Bestimmung der Größe von Zentralskotomen gleichermaßen eignet wie die statische photopische Perimetrie. Durch den geringeren Zeitaufwand und die schnellere und auch bessere Orientierungsmöglichkeit bringt die kinetische Perimetrie im photopischen Bereich Vorteile. Durch die Überschwelligkeit der Reizmarke werden aber besonders relative Skotome leicht übersehen.

Einer der Vorteile der manuellen kinetischen Perimetrie ist die Interaktion zwischen Patient und Untersucher, da sofort auf Fixationsabweichungen und schlechte Mitarbeit reagiert werden kann, oder indem offensichtlich nicht plausible Punkte unmittelbar nachgetestet werden können.

Nachteile des kinetischen Verfahrens liegen in dessen Untersucherabhängigkeit und der reduzierten Möglichkeit der Reproduzierung der Untersuchungsergebnisse.

### 5.3 Statische Perimetrie



**Abbildung 8: Die statische Perimetrie**

In der statischen Perimetrie wird die Schwelle der Lichtunterschiedlichkeitsempfindlichkeit an stichprobenförmig ausgewählten Testorten gemessen. Der Stimulus wird nicht bewegt, sondern mit steigender Leuchtdichte und/oder Größe präsentiert, bis er die Reizschwelle an dieser Stelle des Gesichtsfeldes überschreitet und die

Testperson dies durch ein Signal zu erkennen gibt. Die Schwelle ist tief bei hoher (guter) Empfindlichkeit und hoch bei tiefer (schlechter) Empfindlichkeit.

Bei der statischen Perimetrie erfolgt ein vertikaler Schnitt durch das Empfindlichkeitsgefälle der Netzhaut.

Auf dem Prinzip der statischen Perimetrie aufbauend wurde die Rasterperimetrie entwickelt. Hierbei werden die statischen Prüfpunkte nun nicht mehr entlang eines vorgegebenen Meridians dargeboten, sondern als sogenannte Raster, netzartig über den Gesichtsfeldberg verteilt. Über diesem Prüfpunktraster wird unter Verwendung des statischen Messprinzips Punkt für Punkt die Schwellenermittlung durchgeführt.

Durch die Einführung der Computerperimetrie ist ein neues hochtechnisiertes Verfahren hinzugekommen, welches die perimetrische Untersuchung „genauer“ und vergleichbarer im Ergebnis macht.

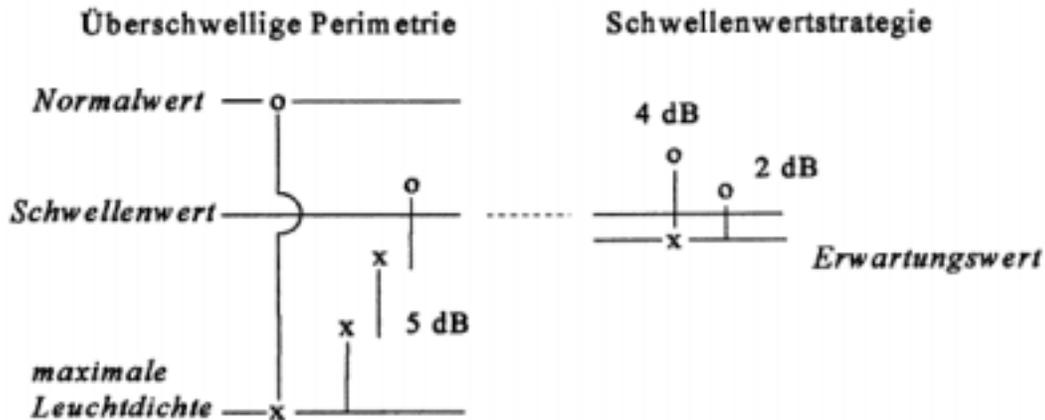
Die Geräte basieren auf dem Prinzip der statischen Perimetrie, jedoch in den meistangewandten Programmen in Form der Rasterperimetrie. Das Prüfpunktraster ist ein entscheidender Faktor für die Qualität und Aussagekraft eines perimetrischen Befundes. Da die meisten Defekte im zentralen und parazentralen Bereich auftreten, sind die Prüfpunkte im Gesichtsfeldzentrum dichter gelegt als in der Peripherie.

Automatisierte Perimeter besitzen spezielle Programme für die zentralen und peripheren Gesichtsfeldanteile, die sich den erwarteten Defekten anpassen.  
[3, 35]

Nicht bei jedem Patienten ist eine automatische Perimetrie durchführbar und sinnvoll, trotzdem werden heute die meisten Gesichtsfeldbefunde an automatischen Perimetern erhoben.

Die Effektivität der automatischen Perimetrie hängt stark von der gewählten Strategie ab. Überschwellige Strategien werden am häufigsten angewendet. Dabei liegt die Testhelligkeit über der normalen Reizschwelle. Als Grundlage der Testhelligkeit dienen die altersbedingten Normalwerte, zu denen ein bestimmter Betrag (4-6 dB) der „Überschwelligkeit“ addiert wird. Bei einer Wahrnehmung dieser Testhelligkeit wird der Prüfort als normal klassifiziert. Diese Methode ist

ungenau bei flachen Relativskotomen. Bei kleineren tiefen Skotomen ist das überschwellige Programm schnell und vom Ergebnis her voll befriedigend.



**Abbildung 9: Vereinfachte Darstellung des Eingabelungsverfahrens bei der schwellenorientiert überschwelligen Strategie und der Schwellenstrategie, x Prüfpunkt erkannt, 0 Prüfpunkt nicht wahrgenommen [59]**

Die Schwellenstrategien sind die genauesten Messmethoden. Sie bestimmen den Schwellenwert durch Überschreitung der Wahrnehmungsschwelle. Zwei Methoden sind heute üblich. Die „Strategie der doppelten Eingabelung“ ist eine zweiphasige Strategie, bei der die Schwelle zunächst mit 4dB, dann mit 2dB Schritten zweimal gekreuzt wird. Bei der zweiten Methode handelt es sich um eine einphasige 3 dB-Strategie.

Bei großen Skotomen kann die Schwellenstrategie in Betracht gezogen werden, insbesondere dann, wenn die Patienten durch zu lange Untersuchungszeiten in ihrer Konzentrationsfähigkeit überfordert werden. Für spezielle Fragestellungen im zentralen Gesichtsfeld, wie unklare Visusminderungen, sollte ein enges Raster mit einer Schwellenstrategie weiterhelfen.

Die überschwellige Strategie ist bei fehlenden bzw. kleinen Skotomen überlegen, denn es erfolgt keine weitere Überprüfung, wenn der Prüfpunkt entsprechend der

dem Perimeter zugrundegelegten Altersnormalkurve erkannt wird, wohingegen die Schwellenwertstrategie eine relativ zeitaufwendige Feinauslotung einsetzt. [59]

Bei der automatischen Perimetrie wird die Güte der Patientenmitarbeit meist durch Fangfragen geprüft. Diese erlauben eine Untersucher-unabhängige Bestimmung der Patientenmitarbeit. Bei den meisten handelsüblichen Perimetern sind daher Tests auf falsch-positive bzw. falsch-negative Antworten standardmäßig in das Untersuchungsprogramm eingeschlossen.

Bei den meisten Perimetern führen Fehlerquoten von mehr als 33% falsch-positiver oder falsch-negativer Antworten zur Annahme eines unzuverlässigen Gesichtsfeldes. Ein Gesichtsfeldbefund mit vielen Fehlern ist mit Vorsicht zu interpretieren und könnte Hinweise auf eine Erkrankung geben. [55]

Zu den gebräuchlichsten Automatikperimetern zählen der Humphrey-Field-Analyzer, Perimeter der Octopus-Reihe und der Tübinger-Automatik-Perimeter.

## **5.5 Der Blinde Fleck – das Referenzskotom**

Die Papille entspricht dem blinden Fleck, der er eine wichtige Kenngröße des monokularen Gesichtsfeldes ist. Im schematischen Auge ist die Papille 2 mm groß in vertikaler Richtung und 1,5 mm in horizontaler. Das entspricht vertikal einem Winkel von  $7^\circ$  und horizontal einem Winkel von  $5^\circ$  ausgehend vom zweiten Knotenpunkt des Auges. Von der Foveola ausgehend ist das Zentrum der Papille  $15^\circ$  in temporaler Richtung und  $2^\circ$  nach unten entfernt.

Die Ermittlung des blinden Fleckes ist für die Überprüfung des zentralen Gesichtsfeldes sehr wichtig, da er ein ideales, immer vorhandenes Referenzskotom darstellt. Durch die Kontrolle des blinden Fleckes sollen Verschiebungen, Verrollungen und Verlagerungen nicht übersehen werden.

In der kinetischen Perimetrie wird mit Hilfe des blinden Fleckes das Verschwinden und das Wiederkehren der Testmarke demonstriert. Der blinde Fleck wird ausperimetriert, indem die Testmarke gewählt wird, die außerhalb des blinden Fleckes gesehen wurde. Auf diese Weise begreift der Proband, worum es bei der kinetischen Perimetrie geht. Auch der Untersucher gewinnt einen Eindruck, wie der Proband mitarbeitet.

Durch die Aufnahme des blinden Flecks in das Prüfpunktraaster der automatischen Perimetrie kann getestet werden, ob die gewählte Rasterdichte fein genug ist, um Skotome dieser Größe zu finden. Durch Erfassung des blinden Flecks kann der Untersucher erfahren, ob der Patient richtig mitgearbeitet hat. Wird er nicht gefunden, so hat der Patient nicht ausreichend fixiert. Voraussetzung ist, dass das Prüfpunktraaster auch bei einer verschobenen Lage des blinden Flecks diesen exakt erfassen kann. [39, 59]

Die Kenntnis der genauen Lage der Fovea am Fundus ist insbesondere bei der Behandlung der choroidalen Neovaskularisation im Rahmen der altersabhängigen Makuladegeneration wichtig. Aufgrund der morphologischen Veränderungen der Makula kann es jedoch schwierig sein, die Fovea exakt zu lokalisieren.

Unter Berücksichtigung des Gefäßmusters am hinteren Augenpol ist es in den meisten Fällen möglich, die Lage der Fovea auf  $1^\circ$  bis  $2^\circ$  genau zu bestimmen.

Eine Studie durchgeführt von Rohrschneider et al [46] ergab, dass die Distanz Fovea-Papille keine sichere Aussage zur Lage des Fixationsortes in Bezug auf die Fovea ermöglichte, da die Distanz großen interindividuellen Unterschieden unterlag. Der Abstand zwischen Fovea und Papille zeigte ebenfalls eine signifikante Abhängigkeit von der Refraktion, wobei mit steigender Myopie eine Abnahme des Winkels zwischen Fovea und Papillenmittelpunkt auftrat. Der Unterschied zwischen dem rechten und dem linken Auge der gleichen Person war dagegen erheblich kleiner. Wenn die exakte Lage der Fovea in einem Auge bestimmt werden kann, sollte deshalb von dieser Hilfsgröße ausgegangen werden.

## **5.6 Zentrale Gesichtsfelduntersuchungen**

Die konventionelle Perimetrie - sei es als computergestütztes statische Perimetrie oder als die klassische Perimetrie mit dem Goldmann-Perimeter - ist zur Bestimmung von zentralen Ausfällen nur bedingt geeignet.

Bei großflächigen Gesichtsfeldausfällen ist es für die Betroffenen schwierig die Anforderungen, die ein automatisch-statisches Verfahren an sie richtet, zu erfüllen, da der präsentierte Stimulus oft in „blinde“ Gebiete fällt. Dafür wird viel Zeit verschwendet, und der Betroffene ist frustriert, da er den Stimulus meist nicht sieht.

Konventionelle automatische perimetrische Verfahren arbeiten üblicherweise mit einer beschränkten Anzahl fest vorgegebener Prüfpunktraster. Bei lokal begrenzten Funktionsausfällen hat dies den Nachteil, dass in ungünstigen Fällen normale Regionen mit einer hohen Prüfpunktzahl belegt werden, während betroffene Bereiche unter Umständen gänzlich ausgespart werden.

Die automatische Schwellenperimetrie benötigt bei Erkrankungen der Makula einerseits eine sehr hohe Rasterdichte, um kleine Defekte nachweisen zu können, andererseits kommt es zu Fixationsschwierigkeiten. Dies führt bei fortgeschrittenen Erkrankungen zu ungenauer Darstellung von Skotomgrenzen und Skotomtiefen.

In diesem Zusammenhang kann die konventionelle kinetische Perimetrie effizienter sein. Diese setzt aber hohe Ansprüche an den Perimetristen. [48]

Ältere Patienten tun sich außerdem schwer, den bei konventionellen Perimetern vorgeschriebenen Fixationspunkt zu finden, da ihre Konzentrationsfähigkeit nach kurzer Zeit nachlässt. Es kommt auch deshalb vermehrt zu Fixationsverlusten.

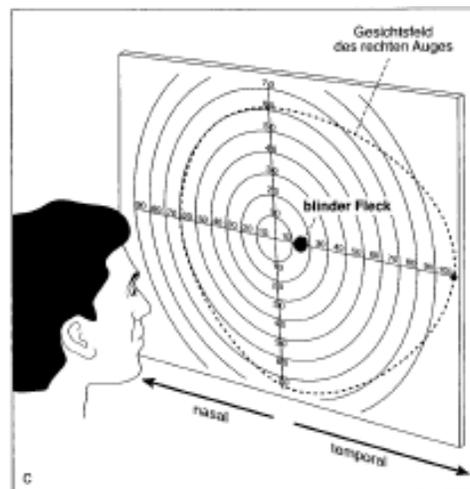
### **5.6.1 Konfrontationstest**

Der Konfrontationstest kann dazu beitragen, grob die Grenzen des Gesichtsfeldes zu bestimmen. Bei Low Vision Patienten kann der Konfrontationstest auch dazu genutzt werden, eine grobe Abschätzung der Größe des Gesichtsfeldausfalles zu ermöglichen.

Die Testperson fixiert dabei mit einem Auge das gegenüberliegende Auge des Untersuchers. Beide decken das nichtbenutzte Auge ab. Der Untersucher bewegt seine Hand in der Ebene zwischen sich und dem Patienten. Dabei vergleicht er sein Gesichtsfeld mit dem der Testperson. [18]

### 5.6.2 Die Kampimetrie

Kampimeter benutzen eine plane Beobachtungsfläche und dienen zur Untersuchung des zentralen Gesichtsfeldes bis etwa 45°. Einer der bekanntesten Kampimeter ist der Bjerrum-Schirm (Tangent Screen).



**Abbildung 10: Kampimetrie**

In der Regel sitzt der Patient in einem Meter Entfernung vor einem grauen oder schwarzen Schirm, der meist mit einer Gradeinteilung versehen ist. Es ist eine zentrale Fixiermarke vorhanden (Abbildung 10). Die Sehobjekte, deren Größe, Helligkeit und Farbe wählbar sind, werden dem Patienten durch Projektion oder auch mechanisch dargeboten. In der Regel werden kleine Sehobjekte ausgewählt.

Zu den Vorteilen der Kampimetrie zählt vor allem die große Flexibilität der Methode. Sie eignet sich sehr gut bei Patienten mit reduzierter Konzentration, bei der Suche nach kleinen parazentralen Skotomen und bei Verdacht auf funktionelle Störungen. Innerhalb von wenigen Minuten kann man mit dieser Methode ein brauchbares Gesichtsfeld erhalten, welches über das zentrale Gesichtsfeld Auskunft gibt. [18]

Bei einem Vergleich der Untersuchungsergebnissen, die mit dem Halbkugelperimeter bzw. dem Kampimeter gewonnen wurden, ist zu beachten, dass zwischen beiden eine perspektivische Verzeichnung besteht.

Zu den Fehlerquellen der Kampimetrie zählen eine nicht konstante Leuchtdichte des Hintergrundes und eine ungünstige Position des Untersuchers, um die Fixation der Testperson zu überwachen.

Als ein weiterer Nachteil der Kampimetrie ist anzuführen, dass das Auge der Testperson nicht von jedem Punkt auf der Untersuchungsfläche den gleichen Abstand hat, da die Netzhaut gewölbt ist und der Bildschirm nicht. Dieser negative Seiteneffekt spielt aber bei den meisten Anwendungen der Perimetrie eine untergeordnete Rolle.

Die neuen Computerkampimeter haben ein 30° Programm zur Untersuchung der vergrößert dargestellten Gesichtsfeldmitte. Dazu gehört der Henson CFA 3000 und der Dicon TKS 4000. Beide verwenden statische Messverfahren.

Das Tübinger Computer Campimeter, welches primär zur Darbietung eines Rauschfeldes konzipiert wurde, sieht die Möglichkeit vor, sowohl statisch automatisiert, als auch kinetisch manuell zu perimetrieren. Die Computermaus wird dabei zur Stimulusführung verwendet. [32]

### **5.6.3 Skotometrie**

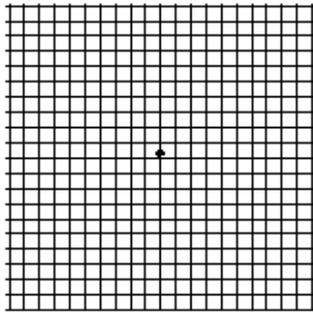
Die Skotometrie dient zur Feststellung und Lokalisierung von Skotomen im fovealen Bereich. Auch das Kampimeter kann dafür eingesetzt werden, wenn sehr kleine Testobjekte bzw. größere Abstände vom Schirm gewählt werden. Die Messungen werden schwierig, wenn das zentrale Sehen betroffen ist, das heißt eine Fixation nicht mehr möglich ist, da der Fixierpunkt nicht erkannt werden kann.

#### **5.6.3.1 Gesichtsfeldtestung nach Haitz**

Das Stereokampimeter nach Haitz erlaubt die Sicherung der Fixation durch das gesunde Auge. Im Stereoskop bietet man beiden Augen eine schwarze Tafel mit konzentrischen Ringen, Diagonalen oder ähnliche Objekte an, die durch markante äußere Teile (z. B. einen Rahmen), die Augen zur Fusion zwingen. Dadurch wird auch das Auge mit dem zentralen Gesichtsfeldausfall auf den Mittelpunkt eingestellt. Die Untersuchung erfolgt mit feinen Weiß- oder Farbobjekten. Bei einem relativen Zentralskotom wird ein geringerer Farbkontrast der Testmarke auf der Seite des geschädigten Auges angegeben; bei absoluten Zentralskotomen wird die Testmarke entsprechend der Größe des Skotoms für das betroffene Auge unsichtbar. [27]

#### **5.6.3.2 Amsler-Test**

Ein weiteres skotomisches Verfahren wird mit dem Amsler-Test realisiert. Das Gesichtsfeld im  $10^\circ$  Bereich kann grob mittels einer Amsler-Tafel geprüft werden. Es handelt sich dabei um eine Tafel mit Gitterlinien und einem zentralen Fixationspunkt, das bei einer Prüferfernung von 30 cm auf die zentrale Netzhaut mit einer Ausdehnung von  $10^\circ$  projiziert wird. Auf diese Distanz ist die Refraktion voll auszukorrigieren. Der Test wird monokular vorgenommen.



Es gibt zwei Ausführungen der Amsler-Tafeln, die helle kontrastreiche und die kontrastarme dunkle Amsler-Tafel. Die hellen Tafeln eignen sich zur Erkennung von Metamorphopsien und absoluten Skotomen. Bei Erkrankung der Makula sieht der Betroffene Unterbrechungen oder Verzerrungen der Gitterlinien.

**Abbildung 11: Amsler Test**

Aufgrund des hohen Kontrastes werden jedoch relative Skotome leicht übersehen. Relative Gesichtsfelddefekte lassen sich mit den kontrastarmen dunklen Tafeln besser aufdecken. [5]

Der Amsler-Test und die Gesichtsfeldtestung nach Haitz sind durch die sehr subjektiven Angaben in ihrer Reproduzierbarkeit eingeschränkt.

Zu weiteren Gründen für die begrenzte Einsetzbarkeit des Amsler-Tests zählen:

1. Der Gesichtsfelddefekt wird meist nicht bemerkt, die Betroffenen bemerken den Defekt in der Regel erst, wenn er die Fovea mit einschließt und/oder relativ groß ist.
2. Die Betroffenen können die Fixation nicht halten.
3. Der "Crowding Effekt", der durch die vielen Linien, die in der Peripherie des Tests dargeboten werden, verursacht wird, führt zu einer geringen Sensibilität des Tests.
4. Der Amsler-Test ist keine interaktive Methode, daher kann die Qualität der Untersuchung nicht eingeschätzt werden, die Messergebnisse können nicht auf ihre Glaubwürdigkeit überprüft werden. [37]

Modifizierung dieser Methoden z. B. mit Veränderungen des Haitz-Schirms durch Gärtner oder die Schwellenbestimmung des Amsler-Tests haben sich in der Praxis nicht durchsetzen können.

#### 5.6.4 Das Scanning Laser Ophthalmoskop

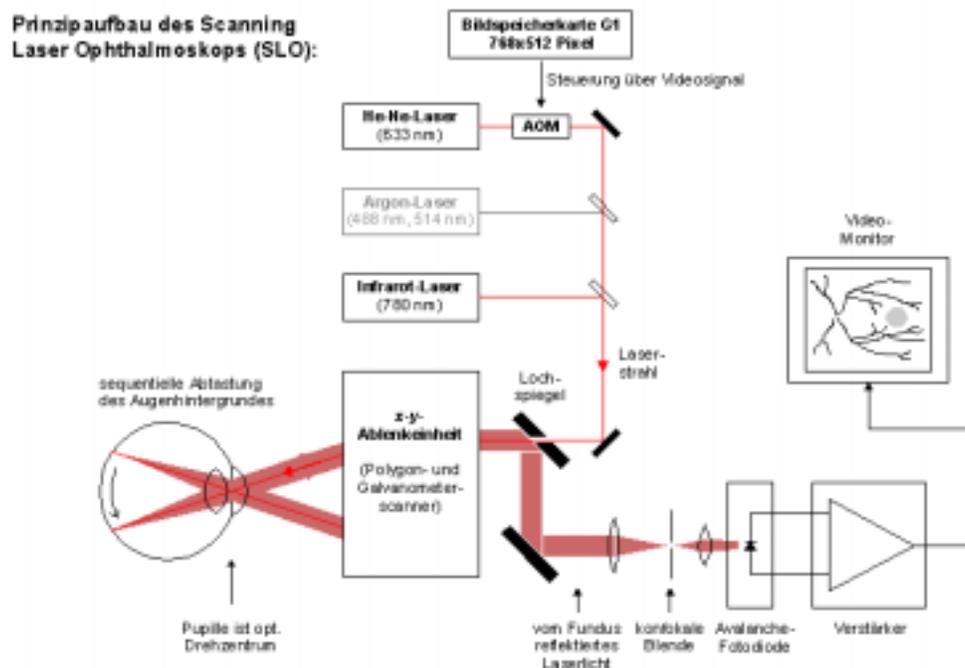
Im Vergleich zur konventionellen Perimetrie ermöglicht die Mikroperimetrie mittels Scanning-Laser-Ophthalmoskop (SLO) eine an der Funduspathologie orientierte Gesichtsfeldprüfung unter unmittelbarer Sichtkontrolle des zu prüfenden Fundusareals. Dadurch können Gesichtsfeldausfälle in ihrer Ausdehnung und Tiefe deutlicher erfasst werden. Auch der Nachweis von Mikroausfällen, die bisher mittels konventioneller Methoden schwer feststellbar waren, ist möglich. Es ist eine exakte Zuordnung zwischen Netzhautort und entsprechender Funktion möglich.

Durch eine gleichzeitige Fixationsregistrierung kann das Fixationsverhalten genau studiert werden. Der Untersucher hat die Möglichkeit unter direkter Sichtkontrolle des Augenhintergrundes auf den Patienten einzuwirken und diesen zu führen. [35]

Die Fundus Perimetrie mit dem Scanning Laser Ophthalmoskop hat dazu beigetragen, das Konzept des visuellen Systems einen Ausgleich für die nicht mehr funktionsfähige Fovea zu schaffen, besser zu verstehen. Es hilft ebenfalls dabei die Entwicklung von Makulaerkrankungen zu verfolgen.

Die Hauptanwendung des SLO's liegt jedoch in der Verlaufsbeurteilung therapeutischer Maßnahmen, da das SLO eine erneute Messung an den exakt gleichen Netzhautorten erlaubt.

Verschiedene Studien über den Einfluss von Lasertherapien fanden heraus, dass die Lesegeschwindigkeit in den behandelten Augen besser war als in den unbehandelten. Messungen mit dem SLO zeigten, dass die zentrale Fixation nach einer perifovealen Laserbehandlung erhalten werden konnte. Es wurde außerdem nachgewiesen, dass die photodynamische Therapie mit Verteporfin das Risiko eines starken Visusverlustes verkleinerte. Die durchgeführte Skotometrie nach der Behandlung zeigte eine Wiederherstellung der retinalen Empfindlichkeit, was mit einer Reduzierung des zentralen Skotoms einherging. [12]



**Abbildung 12: Prinzipaufbau des Scanning Laser Ophthalmoskops [61]**

Das Scanning Laser Ophthalmoskop SLO 101 (Rodenstock Instrumente GmbH, inzwischen WECO) ist mit drei Lasern ausgestattet (Argonlaser mit 488 und 514 nm, HeNe-Laser mit 633 nm und ein Infrarotdiodenlaser mit 780 nm). Zur Bildgebung der hinteren Abschnitte des menschlichen Auges wird ein schwacher Laserstrahl über die Netzhaut gerastert. Das von der Netzhaut reflektierte Licht fällt auf einen Detektor und wird verstärkt. Danach wird auf einem Monitor ein Bild generiert, das bei 40° Bilddiagonale einen 33x21° Fundusausschnitt darstellt. Auf diese Weise erhält der Untersucher auf dem Monitor ein Livebild der Netzhaut, das auf Videoband gespeichert werden kann.

Der optische Aufbau benutzt ferner eine konfokale Optik, d.h. im Beobachtungsstrahlengang wird durch bestimmte Blenden sichergestellt, dass nur Licht aus relativ eng begrenzten Fokalebene genutzt wird.

Durch Modulation der Intensität des HeNe-Laserstrahls lassen sich beliebige Bilder auf den Augenhintergrund des Untersuchten projizieren. Damit ist auch die Projektion verschiedener Stimuli zur Gesichtsfeldmessung oder Fixationsuntersuchung, aber ebenso die Darstellung von Texten zur Untersuchung

des Leseverhaltens möglich. [47]

Da der Untersucher die Fixationsobjekte gemeinsam mit der Netzhaut sieht, kann er exakt die Position der Fovea in Relation zu den Fixationsobjekten bestimmen. Aus der Analyse der Position der Fovea über den Zeitraum des Lesens eines Textes erhält man eine Kurve, die genaue Aussagen über den Lesevorgang ermöglicht.

Durch Verwendung des SLO's lassen sich unter mesopischen Bedingungen Aussagen zum Fixationsverhalten gewinnen, die neben dem Fixationsort auch die Fixationsstabilität beurteilen lassen. Die Bestimmung des Fixationsortes erfolgt durch die Speicherung des Fundusbildes. Eine Wiederholung dieses Vorganges erlaubt die Berechnung der Fixationsstabilität. Durch die Aufzeichnung einer Videosequenz ist auch eine zeitliche Aussage zum Fixationsverhalten möglich.[29]

Die Skotometrie mit Hilfe des Scanning Laser Ophthalmoskops ist eine sehr zeitaufwendige Methode und benötigt eine teure Ausrüstung. Aufgrund dessen wird das SLO nur für gezielte wissenschaftliche Untersuchungen eingesetzt.

## **6. Das computerisierte Auto-Plot-Perimeter**

Das computerisierte Auto-Plot-Perimeter nutzt das kinetische Prüfverfahren und gehört zu den Kampimetern, da ein Bildschirm als Hintergrund genutzt wird. Die Reizdarbietung erfolgt durch Rückflächenprojektion.

Das computerisierte Auto-Plot-Perimeter ist ein Computerprogramm, welches von den Mitarbeitern des Vision Rehabilitation Labors im Schepens Eye Research Institute in Boston/USA entwickelt wurde. Das Auto-Plot-Perimeter der Firma Bausch&Lomb, Rochester, NY diente als Vorbild. Dabei handelt es sich um ein manuelles kinetisches Perimeter, das die Untersuchung der zentralen 50° des Gesichtsfeldes ermöglicht. Das manuelle Auto-Plot-Perimeter wurde hauptsächlich in den USA genutzt. Es ist aber auch dort nur noch sehr selten anzutreffen.

Das Haupteinsatzgebiet des manuellen Auto-Plot-Perimeters war die Detektion von Skotomen im zentralen Gesichtsfeld. Des Weiteren wurde es für die Überprüfung des Tunnelsehens bei Personen mit Retinitis Pigmentosa genutzt.

Ein Grund für die Entwicklung des Computerprogramms war, ein einfach zu nutzendes Hilfsmittel für die Messung des zentralen Gesichtsfeldes zu haben. Es sollte eine große Flexibilität besitzen, da es in verschiedenen Studien eingesetzt werden soll.

Die Überprüfung des Gesichtsfeldes im Gebiet der Sehrehabilitation erfolgt nicht aus diagnostischen Gründen, sondern man erhofft sich Erkenntnisse über die tatsächlichen subjektiven Einschränkungen der Betroffenen. Dafür eignet sich ein kinetisches Verfahren besonders gut.

Der Vergleich zwischen Auto-Plot-Perimeter und Goldmann-Perimeter zeigt, dass Goldmann eine Gesichtsfeldmessung bis hin zu 180° ermöglicht. Dadurch können Schäden in der Peripherie aufgedeckt werden, die z.B. beim Glaukom entstehen.

Auto-Plot beschränkt sich dagegen bei einer Prüferentfernung von einem Meter auf die zentralen 50° des Gesichtsfeldes.

Das zentrale Gesichtsfeld macht beim Auto-Plot-Perimeter ein viel größeren Anteil aus als beim Goldmann-Perimeter. Verschiedene Studien haben ergeben, dass die meisten Gesichtsfeldausfälle innerhalb der zentralen 30° zu finden sind. Wirtschaftler [64] fand z. B. heraus, dass nur 1,3% der auffälligen Gesichtsfelder einen abnormalen äußeren Isopter hatten, wobei die zentralen Isoptere nicht auffällig waren. Diese Beobachtung ist durch den hohen Stellenwert des zentralen Gesichtsfeldes zu erklären.

Das computerisierte Auto-Plot-Perimeter wird zur Zeit ausschließlich für Forschungszwecke genutzt. Das „Low Vision Enabling“ Labor in Lund/Schweden, welches zu Certec gehört, bekam die Genehmigung des Vision Rehabilitation Labors in Boston verschiedene Tests durchzuführen. Ein Ziel dabei war es, Schwachstellen des Programms zu entdecken und gegebenenfalls das Programm zu verändern. Des Weiteren sollte überprüft werden, ob das Auto-Plot-Perimeter verlässliche Ergebnisse bringt, so dass es z.B. anstelle des Goldmann-Perimeters einsetzbar ist.

Das Hauptforschungsgebiet des „Low Vision Enabling“ Labors beschäftigt sich mit der exzentrischen Korrektur. Die meisten Probanden besitzen aufgrund dessen mehr oder weniger große Zentralskotome.

Kenntnisse über das subjektive Gesichtsfeld sind wichtig, um Zusammenhänge zwischen Gesichtsfeldausfall, Wahl des Fixationsortes und Stabilität der exzentrischen Fixation zu verstehen.

Da die Erstellung eines zuverlässigen Gesichtsfeldes bei Personen mit zentralen Gesichtsfeldausfällen sehr schwierig ist, wird häufig in den Kliniken darauf verzichtet, besonders dann wenn große Gesichtsfeldausfälle vorliegen und der Status der Beeinträchtigung über einen längeren Zeitraum konstant war.

Ein Grund für die Schwierigkeiten liegt darin, dass Personen mit zentralen Gesichtsfeldausfällen die herkömmlichen Fixationsmarken der konventionellen Perimeter durch die pathologischen Veränderungen der Makula nicht erkennen

können. Sie haben deshalb keinen Punkt, den sie „zentral“ fixieren können. Zentrale Gesichtsfeldausfälle werden unter anderem so kompensiert, dass die Betroffenen eine hohe Anzahl von Augenbewegungen durchführen, um ihr Umfeld „abzusuchen“. Es fällt ihnen daher schwer eine stabile Fixation über einen längeren Zeitraum aufrechtzuerhalten. Dies führt zu einer hohen Anzahl von Fixationsverlusten während der Untersuchung. Das geringe Fixationsvermögen der Betroffenen führt zu einer erhöhten Streuung der Antworten am Rand des Skotoms, die eine genaue Beschreibung der Grenzen verhindert.

### **6.1 Die verwendeten Fixationsmarken**

Der Verlust der Fovea führt in der Regel dazu, dass die Betroffenen nicht in der Lage sind, das Auge auf den Mittelpunkt der Testfläche einzustellen. Die konventionelle Perimetrie setzt das aber voraus. Ein weiteres Ziel der Studie war deshalb zu untersuchen, ob man Personen mit zentralen Gesichtsfeldausfällen durch unterstützende Fixationsmarken helfen kann, eine stabile zentrale Fixation während der Untersuchung zu erreichen.



**Abbildung 13: der Ring mit den unterstützenden Linien**

Dafür wurden verschiedene Fixationsmarken getestet. Die erste Fixationsmarke war ein kleines Kreuz, das in seiner Größe den herkömmlichen Fixationsmarken entsprach.

Als zweite Fixationsmarke wurde ein Ring (Abbildung 13) genutzt, der sich bei einem Testabstand von einem Meter ca.  $20^\circ$  vom Zentrum der Projektionsfläche entfernt befand. An diesem Ring waren 4 Stäbe montiert, die auf die Mitte der Projektionsfläche zeigten. Der Ring wurde auf eine Plexiglasscheibe aufgemalt, die genau der Größe des Bildschirms entsprach. In der Mitte befand sich ein kreisrundes Loch, welches dazu diente, die Scheibe genau mit der Mitte der Projektionsfläche in Übereinstimmung zu bringen. Die Stäbe waren beweglich. Sie konnten so verschoben werden, dass sie fast ein Kreuz bildeten. Die Idee dahinter war, dass der Ring und die Stäbe zur Orientierung dienen. Sie sollten den Testpersonen helfen, zu erkennen, wo sich die Mitte der Projektionsfläche befindet.

Abhängig von der Größe des Skotoms wurden die Stäbe so positioniert, dass sie so optimal wie möglich als Orientierung dienen konnten. Die Idee hinter dem Ring war, dass der Proband seinen Gesichtsfeldausfall so zentriert wie möglich im Ring positionieren sollte.

Als dritte Fixationsmarke diente ein großes Fixationskreuz, welches für den Probanden sichtbar war. Da das Auto-Plot-Programm eine beliebige Vergrößerung des Fixationskreuzes ermöglichte, konnte die Größe für jeden Probanden individuell so verändert werden, dass er in der Lage war, das Kreuz zu sehen.

Bei dieser Messung sollte der Proband nicht geradeaus sehen, sondern versuchen, das Fixationskreuz so gut wie möglich zu erkennen. Er wurde also aufgefordert, mit einer exzentrischen Netzhautstelle zu fixieren. Somit unterscheidet sich diese Methode grundlegend von der herkömmlichen Perimetrie, da absichtlich von der zentralen Fixation abgewichen wurde.

## 6.2 Beschreibung des Auto-Plot-Perimeters

Das Auto-Plot-Perimeter kann an den heutzutage üblichen Computern genutzt werden. Man braucht zwei Bildschirme, einen Untersuchungs- und einen Steuerbildschirm. Die Steuerung und Verarbeitung der Ergebnisse werden durch einen PC mit Windows-Betriebssystem erreicht, die Darstellung der Ergebnisse erfolgt auf dem Computermonitor.

Die Nutzung eines Bildschirms als Hintergrund ergibt eine hohe Flexibilität in der Darbietung der Stimuli. Es können Stimuli an jedem beliebigen Ort, mit verschiedenen Intensitäten und sogar Formen auf dem Bildschirm dargeboten werden.

Die Leuchtdichte des Stimulus, der Fixationsmarke und des Hintergrundes kann variiert werden. Über die Graphikkarte lassen sich 255 verschiedene Graustufen ansteuern. Außerdem ist eine Vielzahl verschiedener Stimulusgrößen realisierbar.

Die Fixationsmarke kann in ihrer Form aber vor allem in ihrer Größe verändert werden.

Ein weiterer Vorteil des Auto-Plot-Perimeters liegt darin, dass der Abstand zwischen dem zu untersuchenden Auge und der Projektionsfläche variiert werden kann. Somit kann man den Ausschnitt des zu untersuchenden Gesichtsfeldes beeinflussen.

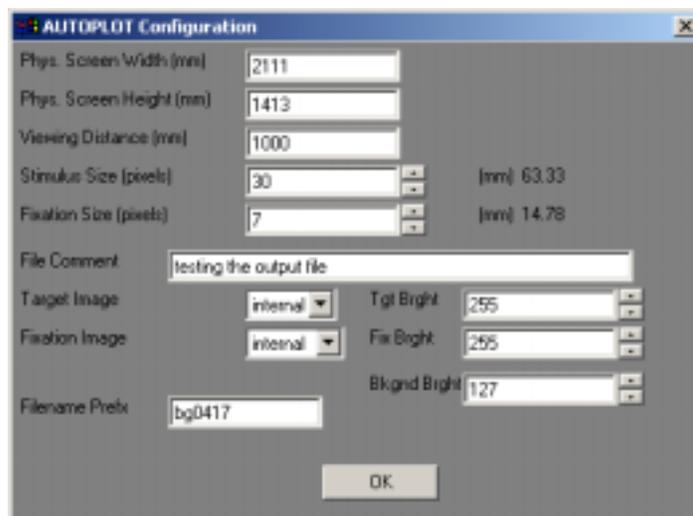


Abbildung 14: Konfigurationstafel des Auto-Plot-Perimeters

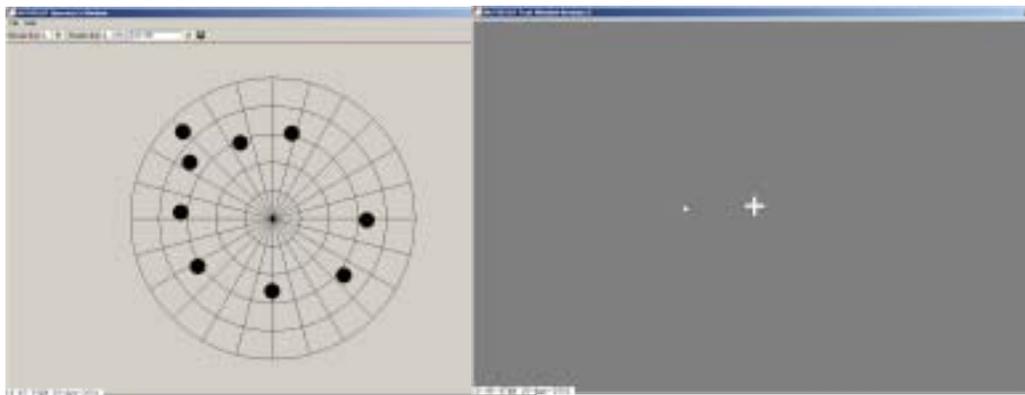
Wenn man das Auto-Plot-Programm öffnet, erscheint die Konfigurationstafel, die in Abbildung 14 zu sehen ist. Die Tafel beinhaltet die Werte der AutoPlot.ini Datei, welche für jede Messung neu erstellt werden. Die einzelnen Parameter sind in der folgenden Tabelle erklärt.

<b>PARAMETER</b>	<b>BESCHREIBUNG</b>
Phys. Bildschirmweite in mm (Phys. Screen Width)	Weite des projizierten Testfeldes in mm, nicht die komplette Bildschirmweite, dieser Parameter bestimmt den Pixel/ mm Umrechnungsfaktor
Phys. Bildschirmhöhe in mm (Phys. Screen Height)	Höhe des projizierten Testfeldes, dieser Parameter hat keinen Effekt auf die anderen Parameter
Prüfabstand in mm (Viewing Distance)	Vom Auge zum Bildschirm
Stimulus Größe (Pixel) Stimulus Size	Durchmesser des Stimulus
Stimulus Größe in mm	Wird vom Programm kalkuliert
Größe der Fixationsmarke (Pixel) Fixation Size	Die Fixationsmarke ist ein Kreuz
Größe der Fixationsmarke in mm	Wird vom Programm kalkuliert
Anmerkungen für die Datei File Comment	Frei wählbarer Text, der in der Datenausgabe erscheint

Form des Stimulus Target Image	Beliebige Formen für die Testmarke nutzbar, sollte auf "intern" gesetzt werden
Stimulus Helligkeit Tgt Brght	0-255; 0 ist Schwarz, 255 ist weiß
Form der Fixationsmarke Fixation Image	Beliebige Formen für die Fixationsmarke nutzbar, sollte auf "internal" gesetzt werden
Dateinamen Prefix	Die Datenausgabe wird mit diesem Dateinamen gesichert Der Anhang ".txt" and ".bmp" ist beigefügt, um den kompletten Dateinamen zu erzeugen
Helligkeit der Fixationsmarke Fix Brght	0-255; 0 ist schwarz, 255 ist weiß
Hintergrundshelligkeit Bkgnd Brght	0-255. 0 ist schwarz, 255 ist weiß

**Tabelle 1: Erklärung der einzelnen Auto-Plot-Parameter**

Nachdem man die einzelnen Parameter festgelegt hat, drückt man die "OK" Taste. Danach erscheinen zwei Fenster. Eins ist das "Steuerfenster", und das andere das "Untersuchungsfenster". Das Untersuchungsfenster wird so lange nach rechts bewegt, bis es mit Hilfe eines Projektors auf dem Bildschirm erscheint. Dies ist durch den "Dual-Head" Modus der Videokarte möglich. Der „Dual-Head“ Modus bewirkt, dass man die zwei Bildschirme so nutzen kann, als ob es einer wäre. Das heißt, die Maus kann kontinuierlich von einem Bildschirm zum anderen bewegt werden. Der Untersuchungsbildschirm ist als erweiterte Fläche des Steuermonitors anzusehen. Die Koordinaten der beiden Bildschirm besitzen das gleiche Koordinatensystem.



**Abbildung 15: der Steuerbildschirm und der Untersuchungsbildschirm**

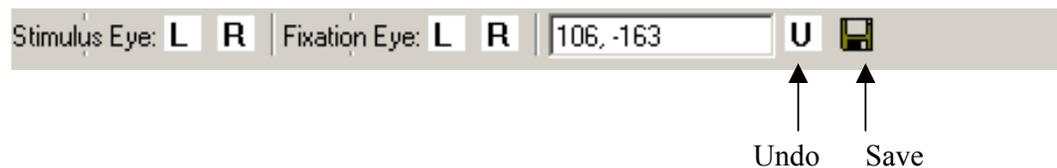
Der Steuerbildschirm stellt das verwendete Untersuchungs raster und die Untersuchungsergebnisse dar. Wenn die Maus im Steuerfeld bewegt wird, bewirkt das eine Bewegung des Stimulus im Testfeld.

Ein Punkt eines Isopters wird durch das Klicken der linken Maustaste markiert. Mit der rechten Maustaste kann der Stimulus abgeschaltet werden.

Erst wenn man die Maustaste loslässt, ist der Stimulus wieder sichtbar. Somit kann eine zusätzliche statische Überprüfung durchgeführt werden.

Das Testraster ist so aufgebaut, dass die konzentrischen Ringe  $5^\circ$  voneinander entfernt sind und die Linien einen Abstand von je  $15^\circ$  besitzen.

Die Symbolleiste für den Untersucher sieht wie folgt aus:



**Abbildung 16: Symbolleiste des Steuerbildschirms**

Die einzigen aktiven Funktionen der Symbolleiste sind die "Undo"- und die "Save"-Funktion. Um einen markierten Punkt wieder zu entfernen, drückt man „U“. Um das Testresultat zu speichern, drückt man auf die „Save“ Taste.

Die Verarbeitung der Ergebnisse wird in zwei Dateien gespeichert, wobei es sich um eine graphische Datei und eine Textdatei handelt. Die Textdatei beinhaltet die ermittelten Koordinaten in ASCII Format. Die Bilddatei wird als BMP gespeichert.

### **6.3 Versuchsaufbau der Auto-Plot-Studie**

Mit Hilfe des Hagner Screenmasters (Firma Hagner, Solna, Schweden) wurde vor Beginn der Untersuchungen eine Leuchtdichteüberprüfung der Stimuli und des Hintergrunds durchgeführt.

Der Hagner Screenmaster ermöglicht nicht nur die Messung der Leuchtdichte sondern auch der Beleuchtungsstärke über eine Breite von 0,1 - 200,00 cd/m<sup>2</sup> und Lux. Somit wurde das Gerät auch zur Messung der Beleuchtungsstärke des Raumes genutzt. Sie betrug für alle Untersuchungen 1 Lux.

Die Perimetrie fand in einem abgedunkelten Raum statt. Die Fenster wurden abgedeckt. Die Raumbelichtung wurde ausgeschaltet, um eine konstante Beleuchtung des Raumes zu gewährleisten.

Für die Projektion des Untersuchungsbildschirmes ist der Daten Projektor U4-131/ U4-111 (Plus Vision Corp., Tokyo, Japan) eingesetzt worden.

Bei dem Untersuchungsbildschirm handelte es sich um ein modulares Großbild-Rückprojektionssystem, welches eine Größe von 1,00 m x 0,75 m und eine Auflösung von 75 dpi (1024 Pixel x 768 Pixel) besaß. Durch die TFT-LCD-Technologie konnte eine pixelgenaue Darstellung und eine flimmerfreie Projektion gewährleistet werden.

Es wurden bei allen Messungen weiße Stimuli mit der maximalen Leuchtdichte

genutzt. Auf dem Untersuchungsbildschirm konnten Stimuli mit Leuchtdichten zwischen minimal  $0,4 \text{ cd/m}^2$  und maximal  $500 \text{ cd/m}^2$  dargeboten werden.

Mit maximaler Stimulusleuchtdichte bei festgelegter Umfeldleuchtdichte und Stimulusgröße ist die Definition eines absoluten Skotoms gegeben. Die ermittelten Skotome bedeuten nicht notwendigerweise, dass in diesem Gebiet überhaupt kein Licht wahrgenommen werden kann. Es bedeutet lediglich, dass die Stimulusleuchtdichte nicht von der Hintergrundleuchtdichte unterschieden werden kann. Wird ein Stimulus mit maximaler Leuchtdichte nicht gesehen, so kann der Stimulus vergrößert werden. Somit ist eine Zuordnung zwischen Stimulusgröße und der Grenze des entsprechenden absoluten Skotoms möglich.

Die Hintergrundleuchtdichte betrug in dieser Studie in der Mitte des Bildschirms  $10 \text{ cd/m}^2$ . Eine gleichmäßige Ausleuchtung des Bildschirms war durch die Projektion auf eine ebene Fläche nicht möglich. Die Variationsbreite der Leuchtdichte auf dem Bildschirm betrug 8 bis  $12 \text{ cd/m}^2$ . Der Bildschirm wurde so eingestellt, dass um die Fixationsmarke die von Goldmann eingeführte Hintergrundleuchtdichte von  $10 \text{ cd/m}^2$  vorhanden war. Die Fixationsmarke war grundsätzlich schwarz.

Die Überprüfung des Gesichtsfeldes erfolgte meist monokular. Das dominante Auge ist grundsätzlich zuerst perimetriert worden. Die Untersuchungen mit dem Ring und dem großen Kreuz wurden mit zwei Stimulusgrößen durchgeführt. Dabei wurde immer mit dem größeren Stimulus begonnen.

Im Gegensatz dazu wurde das schlechtere Auge nur mit einer Stimulusgröße untersucht. Die Bestimmung des besseren Auges erfolgte einerseits über den Visus und andererseits durch die Befragung der Probanden.

Unabhängig von Stimulusgröße und Testauge ist die Untersuchung immer in der gleichen Reihenfolge durchgeführt worden.

Die erste Messung fand mit dem kleinen Fixationskreuz statt, welches für alle Messungen eine Größe von 15 mm besaß. Diese Fixationsmarke entsprach den in

herkömmlichen Perimetern verwendeten Fixationsmarken.

Bei der zweiten Messung wurde die ringförmige Fixationsmarke genutzt (Abb.17). Die dritte Messung erfolgte mit dem großen Fixationskreuz, welches für die Testperson sichtbar war.



**Abbildung 17: Versuchsaufbau**

Die x- und y-Koordinaten des Stimulus konnten im Steuerungsbildschirm abgelesen werden. Um sicherzustellen, dass die Stimuli mit der richtigen Entfernung vom Fixationskreuz dargeboten wurden, wurde mit Hilfe eines Teststimulus überprüft, ob das Testfeld in der richtigen Ratio projiziert wurde. Des Weiteren wurden die blinden Flecke von zwei Testpersonen mit gesunden Augen perimetriert, um festzustellen, ob der blinde Fleck sich in der physiologisch richtigen Position befand.

Diese Kontrolle war sehr wichtig, da schon eine kleine Verschiebung des Projektors zur Projektionsfläche falsche Ergebnisse bringen würde.

Um die Pupille des Probanden so zu fixieren, dass sie genau mit der Mitte des Testfensters übereinstimmte, wurden eine Kopf- und Kinnstütze genutzt. Diese

waren auf einem Tisch montiert, welcher genau mittig zum Bildschirm stand. Die Position des Tisches wurde vor jeder neuen Messung überprüft.

Es wurde auch darauf geachtet, dass der Tisch parallel zum Bildschirm ausgerichtet war. Um dies zu vereinfachen, wurde die richtige Position des Tisches auf dem Boden markiert. Die Markierungen befanden sich in einem Abstand von einem Meter und einem halben Meter. Der Prüfabstand wurde dabei vom Bildschirm bis zum Ring gemessen.

Der Ring war neben der Kopf- und Kinnstütze auf dem Tisch montiert. Er wurde genutzt, um sicherzustellen, dass die Pupille genau mittig zum Bildschirm zentriert war. Dabei wurde auf die horizontale und die vertikale Ausrichtung geachtet.

Jede Messung wurde in einem Prüfabstand von einem Meter begonnen. Diese Prüfentfernung wird für alle Kampimeter empfohlen. Wenn im Verlauf der Messung klar wurde, dass die Grenzen des Skotoms den zu untersuchenden Gesichtsfeldanteil überschritten, wurde die Prüfdistanz halbiert.

Vor jeder Messung wurde der Abstand des Auges vom Bildschirm gemessen, da eine falsche Position des Auges zu verfälschten Ergebnissen führen würde in Hinsicht auf Lage und Größe der Skotome.

Der blinde Fleck wurde zuerst aufgesucht, um dem Probanden das Verfahren zu verdeutlichen. Das Verschwinden und Wiederkehren des Stimulus wurde somit erklärt.

Da in dieser Studie zentrale Ausfälle vorlagen, lag es nah, dieser Region besondere Aufmerksamkeit zu widmen. Der Stimulus wurde in das Zentrum des Testfensters bewegt. Der Proband wurde gefragt, ob er den Stimulus sehen kann. Wenn ein Gebiet mit einem Ausfall gefunden wurde, wurde die Testmarke mit einer Geschwindigkeit von etwa  $2^\circ$  pro Sekunde bewegt und zwar solange bis der Proband ein Signal gab, dass der Stimulus wieder für ihn sichtbar war. Ein entdecktes Skotom wurde stets durch Bewegung aus der nichtgesehenen zur gesehenen Region hin erfasst.

Es wurde darauf geachtet, dass die Untersuchungszeit sich in einem vernünftigen Rahmen bewegte, sie war deshalb nicht länger als ca. 30 bis 40 Minuten pro Auge. Längere Untersuchungszeiten führen zu einer starken Abnahme der Konzentrationsfähigkeit des Probanden, und die Angaben der Testperson werden so unzuverlässig. [18]

In der vorliegenden Studie wurden große Stimuli verwendet, da es sich in der Regel um fortgeschrittene Erkrankungen handelte. Die Stimulusgrößen wurden so gewählt, dass sie in einem Rahmen lagen, der sicherstellte, dass es sich um tiefe Skotome handelte. Die Wahl kleinerer Stimuli wäre nicht sinnvoll gewesen, da die Testpersonen über große Gesichtsfelddefekte und demzufolge über sehr geringe Sehschärfen verfügten.

Ein Vorteil großer Stimuli ist die geringe Beeinträchtigung durch Abbildungsunschärfen. Bei Refraktionsfehlern wird die retinale Abbildung des Stimulus verändert. Der Einfluss der Refraktionsfehler ist bei kleinen Stimuli viel ausgeprägter als bei großen. Das Korrekturglas kann bei der Marke III schon auf eine Dioptrie abgerundet werden. [18]

Die verwendeten Stimuli wurden so gut wie möglich an die Goldmann-Größen angepasst. Bei einem Großteil der Messungen wurde eine Testmarke genutzt, die ungefähr der Goldmann III entsprach. Diese Stimulusgröße wird bei den meisten automatischen Perimetern genutzt. Sämtliche Normwerte sind auf diese Testmarke bezogen. In einigen Fällen wurden größere Stimuli bevorzugt, da schwer geschädigte Gesichtsfelder vorlagen.

<b>Be- zeichnung</b>	<b>Durch- messer in Grad</b>	<b>Durch- messer Goldmann (mm) in 1 m</b>	<b>Durch- messer Auto-Plot (mm) in 1 m</b>	<b>Durch- messer Goldmann (mm) in 0,5 m</b>	<b>Durch- messer Auto-Plot (mm) in 0,5 m</b>
<b>I</b>	0,11	1,86	2	/	/
<b>II</b>	0,22	3,76	4	1,88	2
<b>III</b>	0,43	7,53	8	3,77	4
<b>IV</b>	0,86	/	/	7,52	8

**Tabelle 2: Vergleich der Stimulusgrößen**

Nach der Präsentation der Stimuli braucht der Proband eine gewisse Entscheidungszeit. Im Mittelwert kommt die Antwort nach ca. 0,5 sec.

Da die Reaktionszeiten abhängig sind von der jeweiligen Testperson, wurde sich individuell ein Eindruck darüber verschafft, wie gut und schnell der Proband reagiert.

Während der Messung wurde darauf geachtet, wie glaubwürdig die Angaben des Probanden waren. Bei zögerlichen und unwahrscheinlichen Antworten wurde noch einmal nachgeprüft.

Die Versuchsanordnung war so angelegt, dass der Untersucher sich seitlich vom Probanden befand (Abb.17). Eine direkte Sichtkontrolle war daher sehr schwierig. Bei drei Testpersonen wurden die Messungen mit Hilfe einer herkömmlichen Videokamera aufgenommen, um Fixationsverluste dokumentieren zu können.

Nach Beendigung der Messung wurden die BMP- Dateien als Grundlage genutzt, um die Gesichtsfelder bildlich darzustellen.

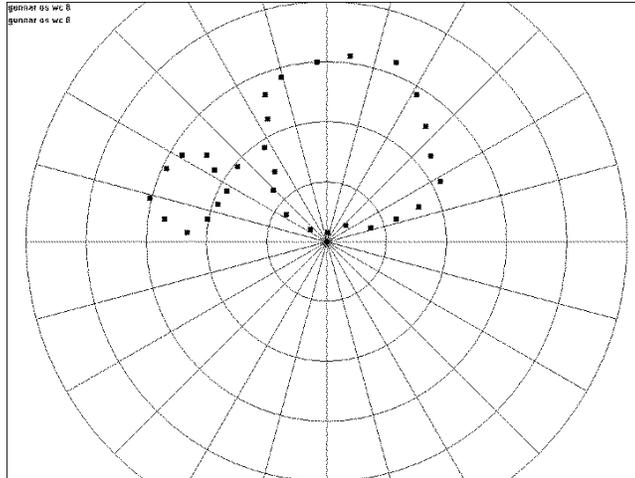


Abbildung 18: BMP-Datei

Die Abbildung 18 zeigt an einem Beispiel, wie das Auto-Plot-Programm das Gesichtsfeld graphisch speicherte. Die Gesichtsfelder wurden danach einzeln bearbeitet und wichtige Informationen zugefügt.

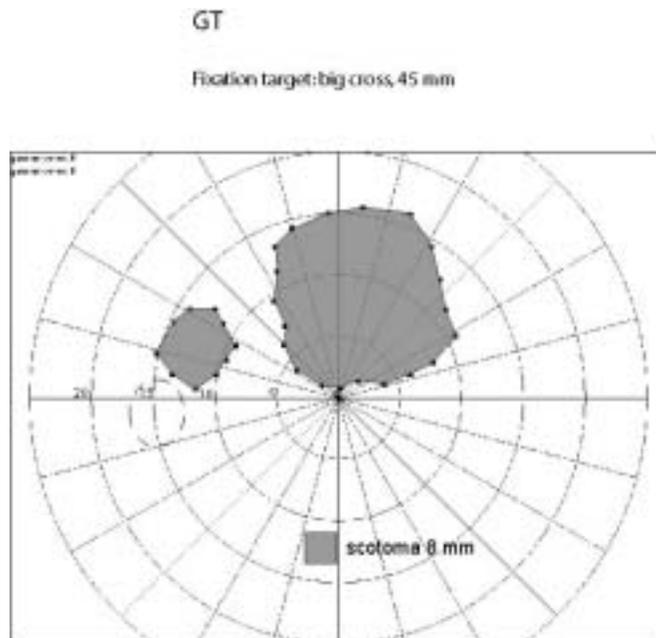


Abbildung 19: bearbeitetes Gesichtsfeld

Die Abbildung 19 zeigt das bearbeitete Gesichtsfeld. Die Skotome wurden grau schraffiert. Die physiologisch richtige Lage des blinden Fleck wurde markiert, um Verschiebungen besser darzustellen. Der verwendete Stimulus und die verwendete Fixationsmarke wurden für jedes Gesichtsfeld mit angegeben.

## 6.4 Testpersonen

Für jeden Probanden wurde ein Protokoll ausgefüllt, welches wie folgt aussah:

### Protocol

**Name:**

**Date of examination:**

**Date of Birth:**

**Gender:**

**Disease:**

**Fixation?**

**Years of Vision Impairment?**

**Visual acuity without correction:**

**OD:**

**OS:**

**Visual acuity with correction:**

**OD:**

**OS:**

**Current Refraction at far distance:**

**OD: sph            cyl            A**

**OS: sph            cyl            A**

**Used Addition:**

**Distance from the screen:**

**Pupil diameter:**

Auf dem Protokoll stehen die Probandendaten, wie z.B. die Diagnose, die Jahre der Sehbehinderung und der Visus. Relevante Parameter, wie der Prüfabstand, die verwendete Addition und die Pupillenweite, wurden ebenfalls dokumentiert.

Zusätzlich konnte im Feld „Fixation“ eingetragen werden, welche Fixationsmarke bevorzugt wurde und warum. Diese Daten wurden in einer Tabelle zusammengefasst, die sich im Anhang befindet.

In dieser Studie wurden 30 Augen von 17 Probanden, sieben Frauen und zehn Männer, im Alter von 30 bis 80 Jahren (Altersdurchschnitt 56,41 Jahre) untersucht. Bei allen Probanden waren in beiden Augen ein zentraler Gesichtsfelddefekt vorhanden.

Die wichtigsten Daten über die Probanden, wie Visus und Krankheitsbild, waren bekannt, da alle Probanden aus dem Probandengut des „Low Vision Enabling“ Labors stammten. Alle Testpersonen hatten ein Screening durchlaufen, um festzustellen, für welche Studien sie geeignet sind.

Voraussetzung für die Auswahl der Probanden war eine gute Kooperationsfähigkeit.

Die Probanden lassen sich in zwei Hauptgruppen einteilen:

1. Retinale Erkrankungen
2. Erkrankungen des Nervus Opticus.

<b>Diagnose</b>	<b>Anzahl der Probanden</b>	<b>Testperson-Initialen</b>
<b>Juvenile Makuladystrophie</b>	8	IP, LM, B-MF, LC, UL, MG, MK, LH
<b>AMD</b>	5	JS, GT, GG, BB, IJ
<b>Optikopathie</b>	3	PP, FJ, KI
<b>Uveitis</b>	1	FM

**Tabelle 3: Verteilung der Erkrankungen**

Dabei lag der Anteil der juvenilen Makuladystrophien bei 47,06%, der Anteil der altersabhängigen Makuladegeneration bei 29,41%. Erkrankungen des Nervus opticus machten 17,65% der Fälle aus. Eine Testperson war an Uveitis erkrankt.

Die Verwertbarkeit eines Gesichtsfeldes hängt unter anderem von der richtigen Korrektur ab. Bei presbyopen Testpersonen muss der Prüfabstand berücksichtigt werden. Die benötigte Addition ergab sich aus der Entfernung von einem oder einem halben Meter und wurde entsprechend mit der Fernkorrektur verrechnet.

Es traten Refraktionen von sphärisch +2,0 bis -16 dpt auf. Es kamen Zylinder bis zu 3 dpt vor. Es wurde gewährleistet, dass die Visuserabsetzung nur durch die Augenerkrankung bedingt war. Refraktionsanomalien über  $\text{sph} \pm 2,0$  dpt  $\text{cyl} \pm 1,0$  dpt wurden nicht zugelassen, da höhere Werte zu Fehlangaben führen können.

Der höchste Visus lag bei 0,16, der niedrigste bei 0,01. In 87,88% der Augen lag die Sehschärfe unter 0,1. Das dominante Auge wurde über den Visus und die Befragung der Testpersonen ermittelt. Bei 47,06% der Testpersonen war es das rechte.

Bei den meisten Testpersonen hatte sich die Erkrankung schon über einen langen Zeitraum manifestiert. Sie waren daher erfahren in Hinblick auf ihre Sehbehinderung. Die Probanden wurden nach dem Zeitraum gefragt, in dem sich die Sehbehinderung im gleichen Stadium befand wie bei der Untersuchung.

Die Anzahl der Jahre der Sehbehinderung lag zwischen drei und 43 Jahren. Im Durchschnitt lag sie bei 13,77 Jahren.

Die Pupillenweite aller Testpersonen betrug mindestens 2,5 mm. Die Pupillenweite bestimmt die Netzhautbeleuchtungsstärke. Da Pupillenweiten über 1,5 mm keinen Einfluss auf das zentrale Gesichtsfeld ausüben (Goldmann), fand sie bei der Auswertung keine Berücksichtigung.

Für vier Testpersonen musste der Prüfabstand auf einen halben Meter verändert werden, da die Skotome die zentralen 50° entweder horizontal oder vertikal überschritten.

## **6.5 Ergebnisse**

Wegen der Vielzahl der Messungen konnten die einzelnen Gesichtsfelder nicht an die Diplomarbeit angehängt werden. Bei Interesse können die Gesichtsfelder zur Verfügung gestellt werden.

Die ermittelten Skotomgrößen wurden für jede Testperson in einer Tabelle aufgelistet (Anhang). Da die meisten Skotome keine kreisrunde Form besaßen, wurden sie in einen vertikalen und horizontalen Durchmesser aufgeteilt. Der verwendete Stimulus wurde für jedes Skotom mit angegeben.

Für die Bestimmung des Skotomdurchmessers wurde das mit dem Ring ermittelte Gesichtsfeld genutzt. In einigen Fällen (LC; MK;GG und LH) war die Skotomgrenze entweder horizontal oder vertikal nicht zu finden, da das Skotom den untersuchten Gesichtsfeldanteil überschritt.

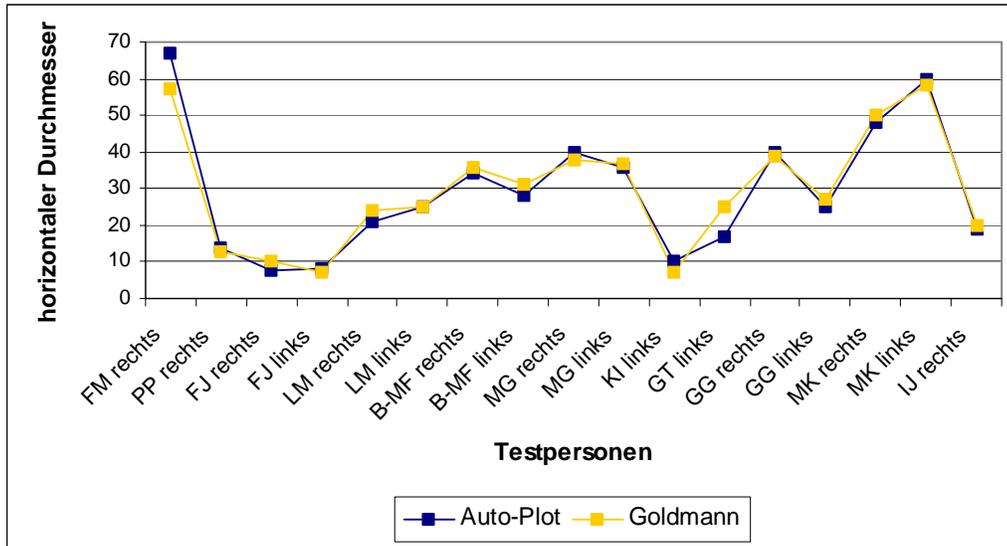
### **6.5.1 Vergleich: Auto-Plot und Goldmann**

Ein Ziel der Studie war, zu ermitteln, ob die Resultate des Auto-Plot-Perimeters vergleichbar sind mit den Ergebnissen handelsüblicher Perimeter. Um dies zu klären, wurden schon vorhandene Goldmann-Gesichtsfelder zum Vergleich herangezogen. Diese waren für insgesamt 13 Testpersonen verfügbar.

Ein Vergleich der Gesichtsfelder war trotzdem schwierig, da die Testbedingungen voneinander abwichen. Besonders die Leuchtdichten der Stimuli unterschieden sich voneinander. Die Stimulusgröße und die Hintergrundleuchtdichte des Auto-Plot-Perimeters orientierten sich am Goldmann-Gerät, um einen Vergleich zu vereinfachen. Erschwerend kam jedoch hinzu, dass die verwendeten Goldmann-Felder größtenteils vor einigen Jahren angefertigt wurden.

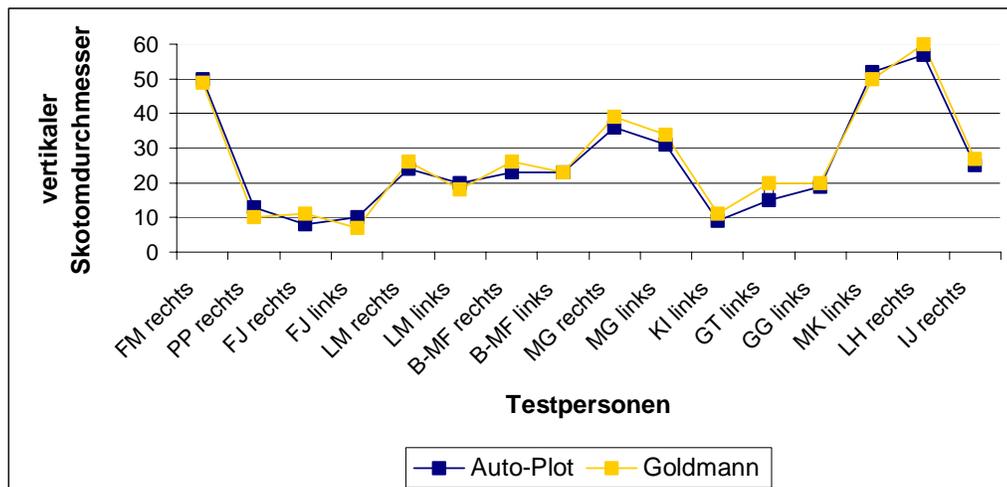
Eine exakte Übereinstimmung der Gesichtsfelder wurde aus den oben genannten Gründen nicht erwartet. Trotzdem wurde der Frage nachgegangen, ob das Auto-Plot-

Perimeter vergleichbare oder vielleicht sogar präzisere Informationen über die Größe und Lage des Gesichtsfelddefekts verschafft.



**Diagramm 1: Vergleich der horizontalen Durchmesser**

Die Gesichtsfelder wurden so verglichen, dass die ermittelten Skotome auf ihren vertikalen und horizontalen Durchmesser untersucht wurden. Bei dem Vergleich konnte nicht berücksichtigt werden, dass die verwendeten Stimuli unterschiedlich waren.



**Diagramm 2: Vergleich der vertikalen Durchmesser**

Obwohl die Testbedingungen unterschiedlich waren und Jahre zwischen den Untersuchungen lagen, wichen die Ergebnisse kaum voneinander ab.

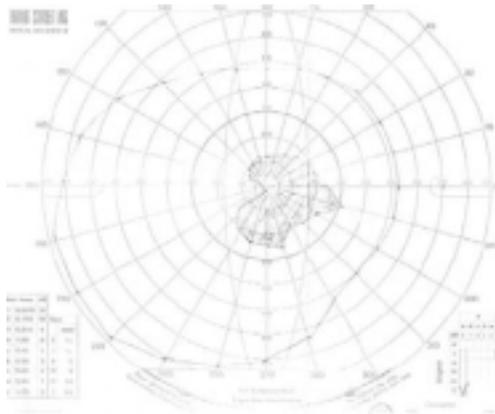
Die isolierte Auswertung bezüglich der horizontalen und vertikalen Durchmesser ergab nur eine geringe Streuung zwischen Auto-Plot- und Goldmann-Perimeter (Diagramm 1 und 2). Der Mittelwert der Abweichung lag beim horizontalen Durchmesser bei  $2,62^\circ$  und beim vertikalem Durchmesser bei  $2,38^\circ$ .

Somit waren keine signifikanten Unterschiede bei der Skotomgröße feststellbar.

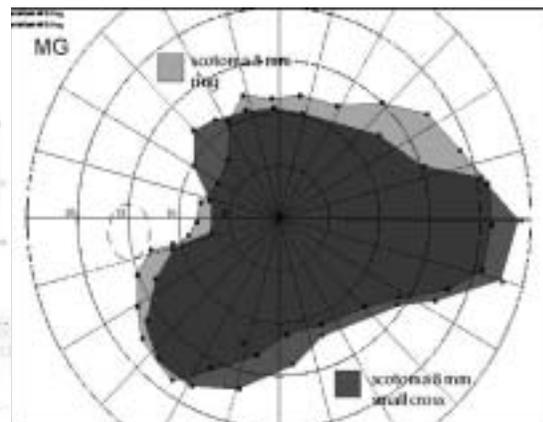
Eine mögliche Erklärung dafür könnte sein, dass es sich in den meisten Fällen um absolute Skotome handelte.

Der Vergleich der beiden perimetrischen Methoden ergab weiterhin, dass nicht nur die ermittelten Durchmesser sondern auch die Form der Skotome in vielen Fällen ähnlich waren.

Die Abbildungen 20 und 21 zeigen das Gesichtsfeld des linken Auges der Testperson MG. Die rechte Abbildung zeigt das Auto-Plot Ergebnis. Links ist das Goldmann-Feld abgebildet. Dieses Beispiel verdeutlicht anschaulich, dass nicht nur die Größe sondern auch die Form der Skotome weitgehend übereinstimmte.



**Abbildung 20: Goldmann-Feld des linken Auges von MG**



**Abbildung 21: Auto-Plot-Feld des linken Auges von MG**

### 6.5.2 Einfluss der Stimulusgröße

Um die Tiefe der einzelnen Skotome zu bestimmen, wurden unterschiedliche Stimulusgrößen eingesetzt. Dazu wurden meistens der 8- und 4-mm Stimulus genutzt.

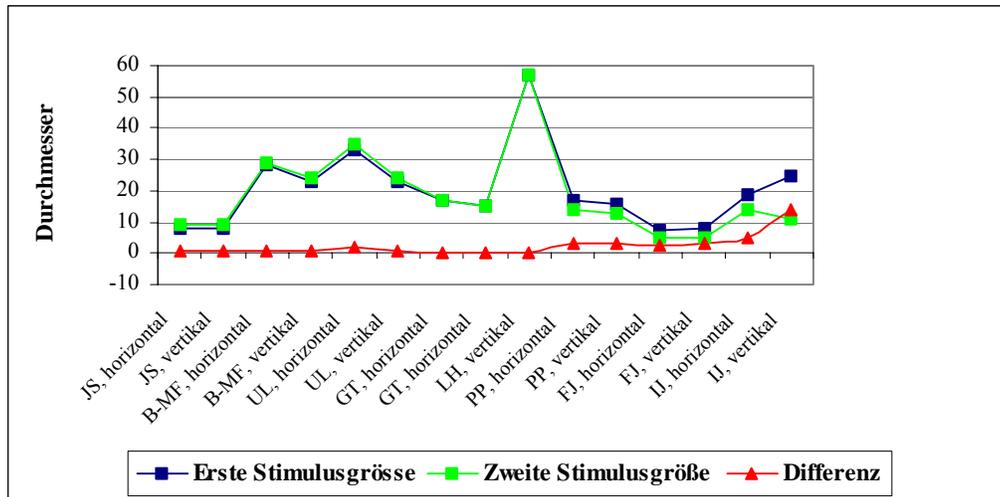


Diagramm 3: Einfluss der Stimulusgröße

Bei acht Testpersonen wurde das dominante Auge mit zwei Stimulusgrößen perimetriert. Die Differenz der Skotomgrößen ist im Diagramm 3 dargestellt.

Bei den ersten fünf Testpersonen, die im Diagramm aufgeführt sind, lag die Differenz im Durchschnitt bei nur  $0,78^\circ$ .

In Abbildung 22 ist als Beispiel das Gesichtsfeld der Testperson GT zu sehen.

Der Skotomdurchmesser blieb bei der Überprüfung mit zwei Stimulusgrößen nahezu konstant. Das wies daraufhin, dass es sich in diesem Fall um ein tiefes absolutes Skotom handelte, welches eine klar definierte Grenze besaß.

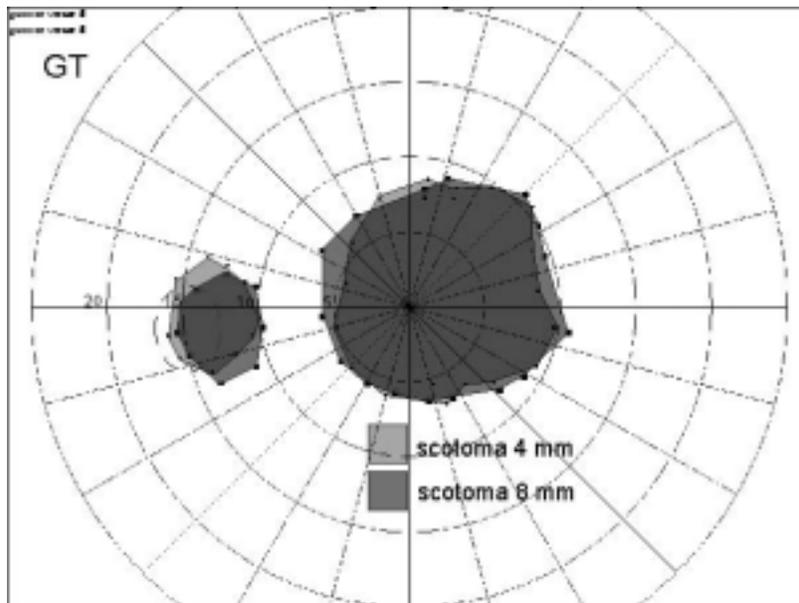


Abbildung 22: Gesichtsfeld des linken Auges von GT, Ring

Bei den Testpersonen FJ, PP und IJ liegt der Mittelwert der Abweichung dagegen bei  $5,1^\circ$ . In diesen Fällen hatte die Nutzung verschiedener Stimulusgrößen einen großen Einfluss auf den Durchmesser des Zentralskotoms.

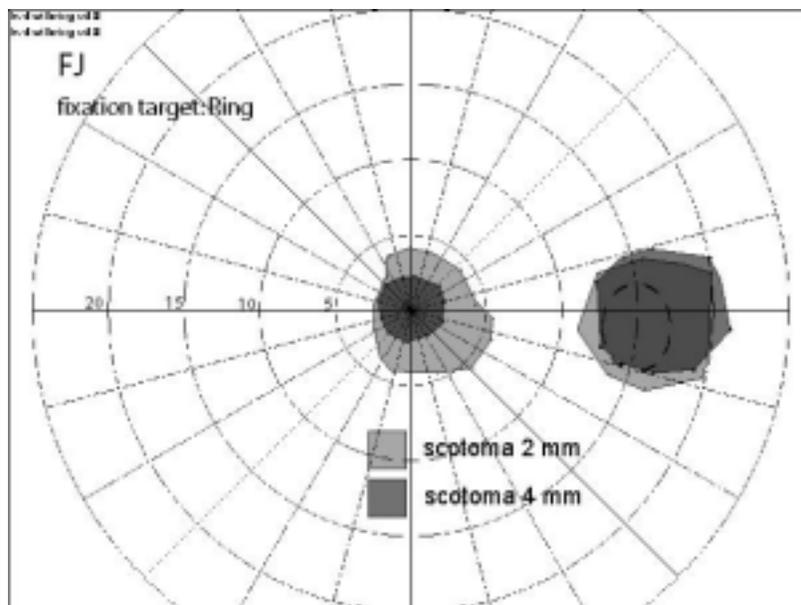


Abbildung 23: Gesichtsfeld des rechten Auges von FJ, Ring

Die Abbildung 23 verdeutlicht diesen Zusammenhang an der Testperson FJ, bei der sich der Durchmesser des Zentralskotoms verdoppelte.

Dies lässt den Schluss zu, dass die Tiefe der Defekte nicht bis an den Rand konstant war. Die Skotomgrenzen waren somit nicht scharf begrenzt. Bei FJ, PP und KI lagen relative Skotome vor.

### **6.5.3 Lage des exzentrischen Fixationsareals**

Die Untersuchungen mit dem kleinen für die Testperson nicht sichtbaren Fixationskreuz und dem Ring unterschieden sich grundlegend von der Untersuchung mit dem für die Testperson sichtbaren Kreuz.

Mit dem vergrößerten Fixationskreuz sollte die Lage des exzentrischen Fixationsareals gefunden werden. Voraussetzung war, dass die Testperson die Netzhautstelle wählte, mit der eine Fixation des Kreuzes am besten möglich war. Man kann also davon ausgehen, dass diese Netzhautstelle unter den gegebenen Bedingungen das beste Auflösungsvermögen besaß.

Wie in verschiedenen Studien nachgewiesen, muss es sich dabei nicht grundsätzlich um die Netzhautstelle handeln, die zur Fixation genutzt wird und so z.B. auch zum Lesen eingesetzt wird.

16 von 17 Probanden nutzten während der Gesichtsfeldüberprüfung mit dem großen Kreuz eine exzentrische Netzhautstelle zur Fixation. Das genutzte Fixationsareal befand sich dabei in den meisten Fällen am Rand der Läsion.

In den Fällen, in denen der blinde Fleck auffindbar war, wurde über die Verschiebung des blinden Fleckes die exzentrische Fixation ermittelt.

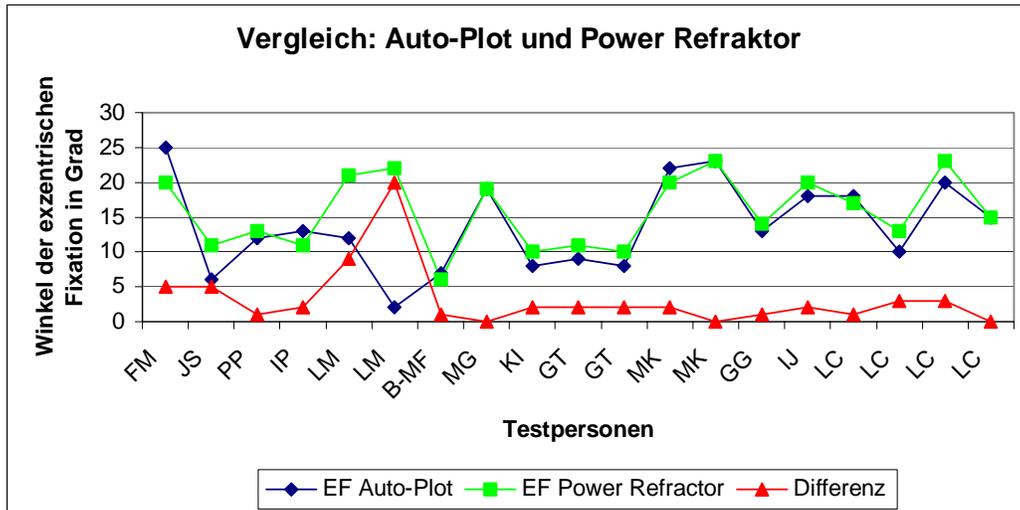
Wenn der blinde Fleck im Skotom eingebettet war, wurde die Lage des Skotoms, welches mit dem großen Kreuz ermittelt wurde, verglichen mit dem Ergebnis des Rings. Die Verschiebung des Skotoms wurde dann als Wert der exzentrischen

Fixation angegeben. Die Methode setzte voraus, dass die Testperson mit Ring „zentral fixiert“ hatte. Da dieser Faktor nicht überprüfbar war, sind die Ergebnisse nur Richtungswerte.

Um nachvollziehen zu können, ob die ermittelten Werte für die exzentrische Fixation der tatsächlich bevorzugten Richtung entsprachen, wurden sie mit den Ergebnissen des Power Refraktors verglichen.

Der Power Refraktor wurde in einer Studie des „Low Vision Enabling“ Labors genutzt, um die exzentrische Korrektur von Betroffenen mit Zentralskotomen zu ermitteln. Das Gerät gibt in diesem Zusammenhang auch Auskunft über den Winkel und die Richtung der exzentrischen Fixation. Der Power Refraktor berechnet die exzentrische Fixation über die Verschiebung der optischen Achse des Auges.

Die Lage des exzentrischen Fixationsareals wurde somit einmal über die Verschiebung des blinden Flecks und das andere mal über die Verschiebung der optischen Achse ermittelt. Dies führte dazu, dass mit keiner Übereinstimmung der Ergebnisse zu rechnen war, da der Abstand zwischen Fovea und Papille sowie der Winkel Gamma individuell unterschiedlich sind. Der Winkel Gamma entspricht dem Winkel zwischen Fixierlinie und optischer Achse des Auges.



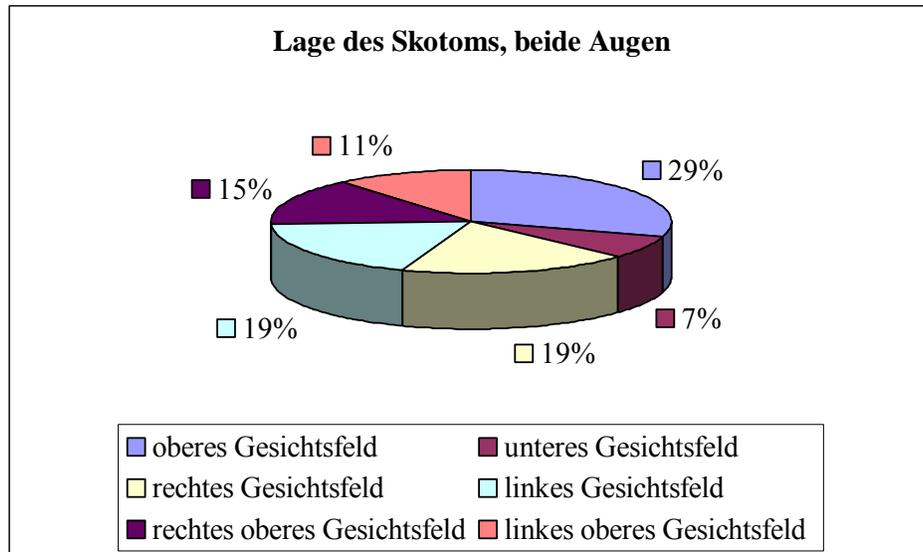
**Diagramm 4: Vergleich der exzentrischen Fixationswinkel ermittelt mit dem Auto-Plot-Perimeters und dem Power Refraktor**

Für 17 Augen waren die Daten des Power Refraktors vorhanden. In 88,24% stimmte die angegebene Fixationsrichtung des Power Refraktors mit dem Ergebnis des Auto-Plot-Perimeters überein.

Das Diagramm 4 zeigt die exzentrischen Fixationswinkel. Es wurden jeweils die Winkel verglichen, welche die gleiche Richtung aufwiesen. Im Durchschnitt lag eine Abweichung vom Auto-Plot-Perimeter zum Power Refraktor von  $3,21^\circ$  vor.

Testperson LM zeigte die größte Abweichung. Sie betrug  $9,5^\circ$  im rechten und  $20^\circ$  im linken Auge. Mit dem Power Refraktor wurde im linken Auge hauptsächlich eine Verschiebung nach oben festgestellt. Im Gegensatz dazu verschob sich das Skotom bei der Messung mit dem Auto-Plot hauptsächlich nach rechts (Abb.24). Da LM schon seit einiger Zeit an verschiedenen Studien des „Low Vision Enabling“ Labors teilnimmt, war bekannt, dass sie mehrere Fixationsareale aktiv nutzt und auch zwischen ihnen wechseln kann. Wenn man LM nicht mit berücksichtigt, liegt der Mittelwert der Differenz bei  $1,88^\circ$ .

Diagramm 5 zeigt in welchen Gesichtsfeldanteil das Skotom verschoben worden ist. Die bevorzugte Richtung der exzentrischen Fixation war dabei mit 29% nach oben. Dieses Ergebnis stimmt mit den meisten Studien über das Fixationsverhalten bei Vorliegen eines Zentralskotoms überein.

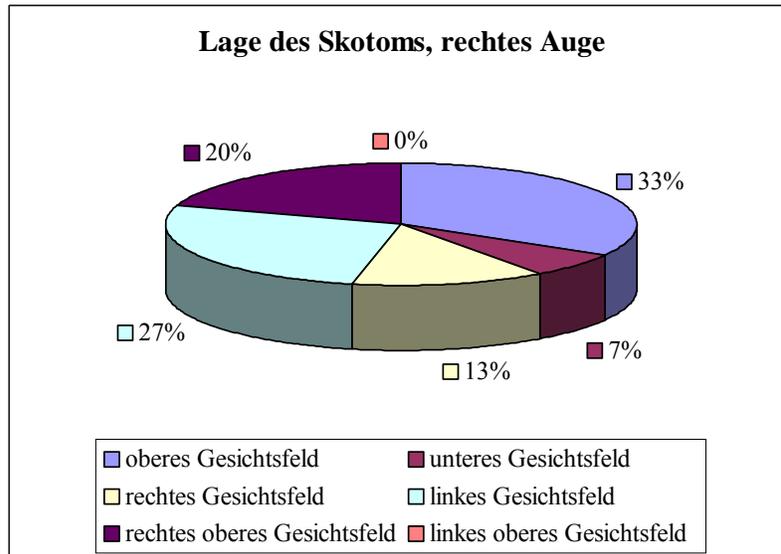


**Diagramm 5: Lage des Skotoms im Gesichtsfeld, Prozentzahlen beider Augen**

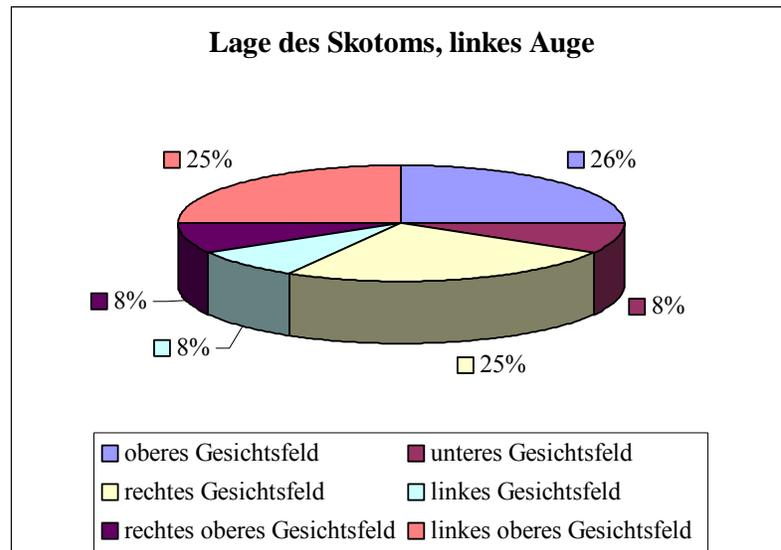
Mit je 19% wurde das Skotom entweder in das rechte oder linke Gesichtsfeld verschoben. Eine Verschiebung des Skotoms nach unten war nur bei einer Testperson (LC) feststellbar.

Es traten Unterschiede zwischen dem rechten und linken Auge auf. Bei einer reinen horizontalen Verschiebung wurde das Skotom im rechten Auge bevorzugt ins linke Gesichtsfeld verschoben (27%), im linken Auge dagegen bevorzugt nach rechts (25%). In beiden Fällen lag der exzentrische Fixationsort in der temporalen Gesichtsfeldhälfte und somit in der nasalen Netzhaut.

Wenn eine Kombination aus horizontaler und vertikaler Verschiebung vorlag, war die bevorzugte Richtung im rechten Auge nach rechts oben (20%) und im linken Auge nach links oben (25%).

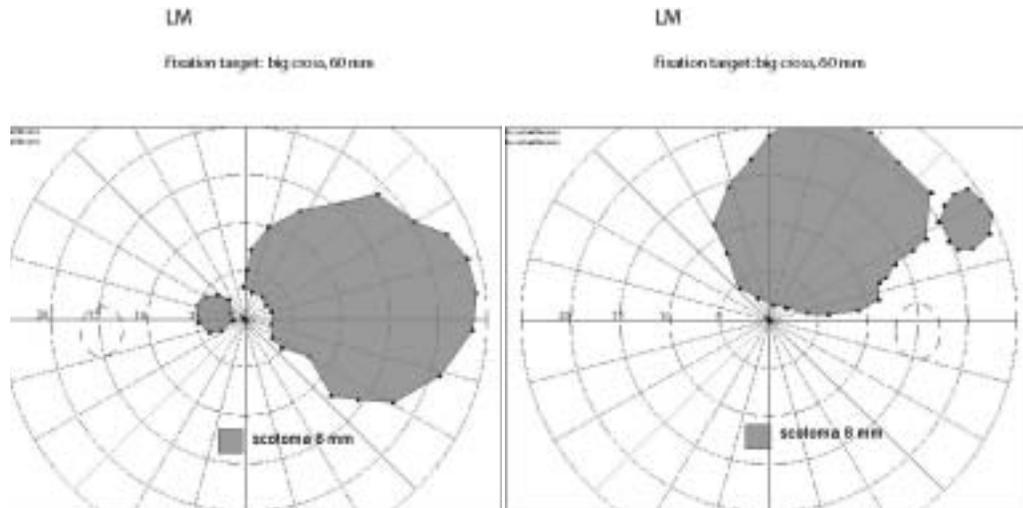


**Diagramm 6: Lage des Skotoms im rechten Auge**



**Diagramm 7: Lage des Skotoms im linken Auge**

In sechs der elf untersuchten Augenpaare wurde die gleiche exzentrische Fixationsrichtung festgestellt. Die Abbildung 24 und 25 zeigen die Gesichtsfelder der Testperson LM. Sie wählte zwei sehr verschiedene exzentrische Fixationsrichtungen für das rechte und das linke Auge. Für das rechte Auge nutzte sie eine PRL, die unter dem Skotom lag, und für das linke Auge benutzte sie eine PRL, die links vom Skotom lag.



**Abbildung 24: Gesichtsfeld des linken Auges von LM, großes Kreuz**

**Abbildung 25: Gesichtsfeld des rechten Auges von LM, großes Kreuz**

#### **6.5.4 Abstand des exzentrischen Fixationsareals von der Skotomgrenze**

Die Testpersonen, bei denen die Änderung der Stimulusgröße keine signifikante Verschiebung der Skotomgrenze bewirkte, nutzten eine PRL, die sehr nah an der Läsion lag. Die PRL war im Durchschnitt  $1,80^\circ$  von der Skotomgrenze entfernt. Die Spannweite war von weniger als  $1^\circ$  bis zu  $5^\circ$ .

Keine dieser Testpersonen war in der Lage, den 8-mm Stimulus durch das Skotom wahrzunehmen, was die Annahme zulässt, dass absolute Zentralskotome vorlagen, welche eine klar definierte Grenze besaßen. Diesen Testpersonen fiel es leicht das große Fixationskreuz mit ihrer PRL zu fixieren. Die PRL hatte sich an einer genau definierten Netzhautstelle ausgeprägt.

Anders dagegen die Testpersonen (außer FJ), bei denen die Änderung der Stimulusgröße eine signifikante Verschiebung der Skotomgrenze bewirkte und die ein relatives Skotom besaßen. Sie nutzten eine Netzhautstelle zur Fixation, die zwischen  $2,5^\circ$  und  $10^\circ$  von der ermittelten Skotomgrenze entfernt war. Im Durchschnitt lag der Abstand bei  $4,5^\circ$ . Diesen Testpersonen fiel es schwer eine stabile exzentrische Fixation zu erreichen und diese an einer einzigen Netzhautstelle zu halten.

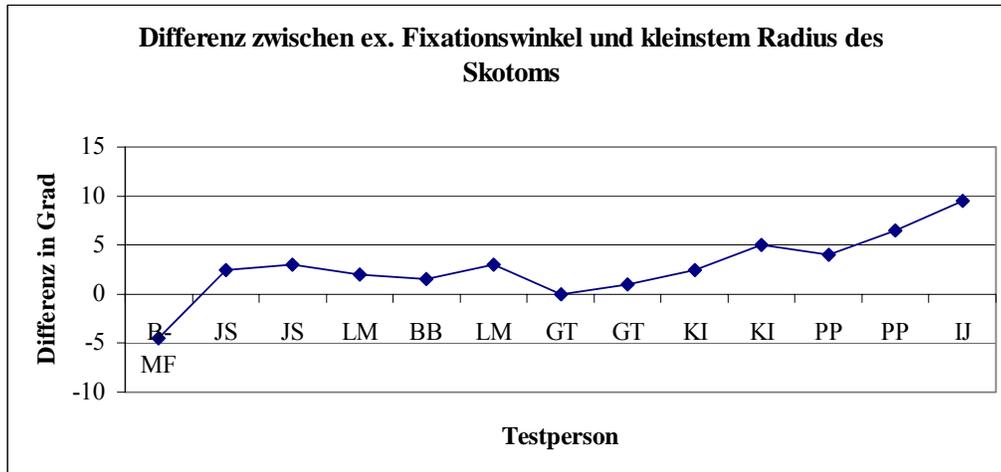
Bei der Betrachtung des Abstands zwischen PRL und Skotomgrenze konnte außerdem beobachtet werden, dass der Abstand zwischen PRL und Skotomgrenze im dominanten Auge in 81,81% der Augenpaare kleiner war als im Folgeauge.

#### **6.5.5 Skotomdurchmesser und Wahl des exzentrischen Fixationsareals**

Da die Fixationsareale sich außer bei FJ außerhalb des Skotoms befanden, könnte man annehmen, dass der exzentrische Fixationswinkel mindestens dem Radius des Skotoms entspricht. Voraussetzung dafür ist, dass das Skotom sich konzentrisch um die Fovea ausgebildet hat.

Diagramm 8 zeigt die Ergebnisse der Messungen bei 13 Augen, bei denen der blinde Fleck genutzt werden konnte, um den exzentrischen Fixationswinkel zu bestimmen und somit einen Vergleich mit dem kleinsten Radius des Skotoms zu ermöglichen.

Bei acht Augen war der blinde Fleck in das Skotom eingebettet. Da eine exakte Bestimmung des exzentrischen Fixationswinkels somit nicht möglich war, wurden diese Fälle nicht in das Diagramm mit einbezogen.



**Diagramm 8: Differenz zwischen dem exzentrischen Fixationswinkel und dem kleinsten Radius des Skotoms**

Das Diagramm 8 zeigt, dass in den meisten Fällen eine annähernd lineare Abhängigkeit vorlag. Eine positive Differenz, wie sie für zwölf Augen ermittelt wurde, bedeutete, dass der kleinste Skotomradius mindestens so groß war wie der exzentrische Fixationswinkel. Dies war zu erwarten, da in der Regel ein Abstand zwischen Skotomgrenze und Fixationsareal bestand. Nur bei Testperson B-MF war der Winkel der exzentrischen Fixation kleiner als der Radius des Gesichtsfeldausfalls. Der Skotomradius des linken Auges betrug bei B-MF  $14^\circ$  horizontal und  $11,5^\circ$  vertikal, der exzentrische Fixationswinkel betrug dagegen circa  $7^\circ$ . In diesem Fall hatte sich das Skotom nicht konzentrisch um die Fovea ausgebildet.

Die Betrachtung der Augen, bei denen der blinde Fleck im Zentralskotom mit eingebettet war, zeigte tendenziell ebenfalls eine lineare Abhängigkeit. Dies konnte aber durch die oben genannten Gründe nicht verifiziert werden.

### 6.5.6 Vergleich: Optikopathien und Netzhauterkrankungen

Eine Erkrankung der Netzhaut hat eine Schädigung des ersten Neurons zur Folge, wohin gegen eine Optikopathie eine Schädigung des dritten Neurons verursacht.

Um die Auswirkungen einer Erkrankung des Nervus opticus zu untersuchen, standen die Daten von insgesamt drei Probanden zur Verfügung. Um die hier ermittelten Ergebnisse zu bestätigen, müsste eine größere Anzahl von Probanden untersucht werden.

Testperson FJ litt unter einer Erkrankung des Nervus opticus. Er benutzte als einzige Testperson ein Fixationsareal innerhalb des Skotoms. Die folgende Abbildung zeigt das Gesichtsfeld des rechten Auges von FJ.

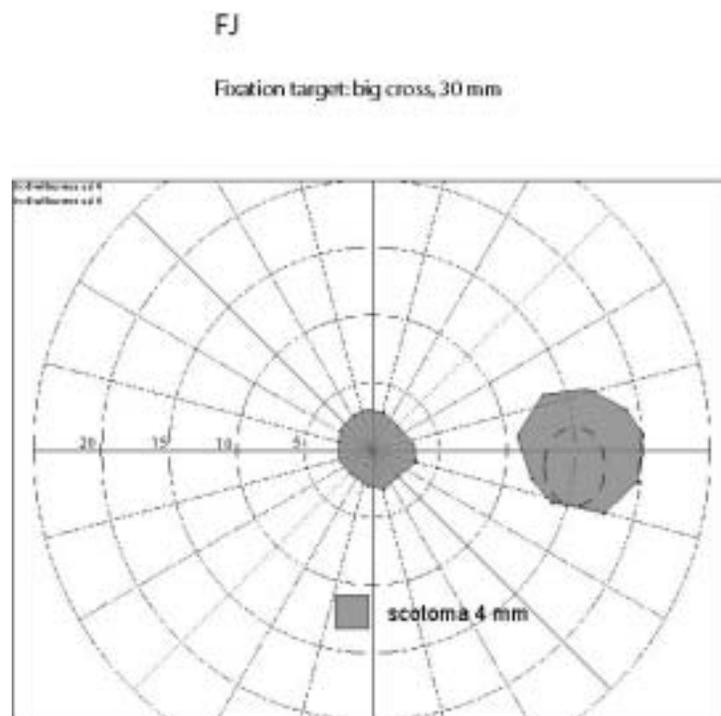
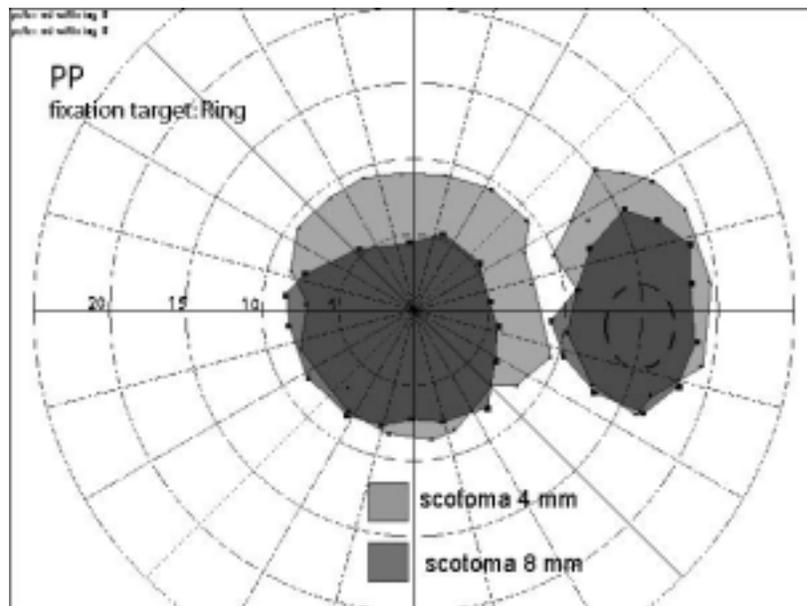


Abbildung 26: Gesichtsfeld des rechten Auge von FJ.  
großes Kreuz

FJ war in der Lage, das große Fixationskreuz durch das Skotom wahrzunehmen. Dies wies darauf hin, dass es sich um ein relatives Skotom handelte. Das wurde auch dadurch bestätigt, dass er den 8-mm Stimulus im zentralen Gesichtsfeld sehen konnte. Es wurde deshalb der 4- und der 2-mm Stimulus genutzt, mit denen Ausfälle im Zentrum nachweisbar waren. Testperson KI war ebenfalls in der Lage den 8-mm Stimulus im Zentrum wahrzunehmen und besaß deshalb ebenfalls ein relatives Zentralskotom.

Alle Testpersonen, die unter der Leberschen Optikusatrophie litten, wiesen neben einem Zentralskotom einen vergrößerten blinden Fleck auf.

In der Abbildung 27 kommt die Vergrößerung des blinden Flecks gut zum Ausdruck, da der blinde Fleck bei PP um mehr als das Doppelte vergrößert war.



**Abbildung 27: Gesichtsfeld des rechten Auges von PP, Ring**

Die genaue Bestimmung der ursprünglichen Lage des physiologischen blinden Fleckes war bei den Probanden mit einer Leberschen Optikusatrophie aufgrund der pathologischen Veränderungen nicht mehr möglich.

Im Fall von Testperson FJ war es deshalb schwer zu entscheiden, ob eine zentrale

Fixation vorlag oder nicht. Wenn man davon ausgeht, dass die Veränderung des blinden Fleckes bei einer Erkrankung des Nervus opticus konzentrisch ist, verschob sich die Fixation bei FJ in beiden Augen um  $2^\circ$  nach rechts.

Beim Vergleich der Probandengruppen fällt weiterhin auf, dass der Stimulus bei den Testpersonen mit einer Optikopathie sehr langsam bewegt werden musste, da diese sehr empfindlich auf Bewegung reagierten. Die durchschnittliche Geschwindigkeit von  $2^\circ$  pro Sekunde, die normalerweise genutzt wurde, musste hier reduziert werden. In diesen Fällen wurde bei unsicheren Antworten statisch nachgeprüft, ob der unbewegte Stimulus an dieser Stelle sichtbar war.

Alle drei Testpersonen mit einer Optikopathie hatten ein relatives Zentralskotom entwickelt im Gegensatz zu 93% der Probanden mit einer Netzhauterkrankung. Daraus folgt, dass noch rudimentäre Reste von neuronalen Verbindungen vorhanden waren.

Die Ergebnisse der Testpersonen mit einer Netzhauterkrankungen wiesen dagegen eher darauf hin, dass die Rezeptorenschicht im Bereich der Makula vollständig funktionsunfähig war.

### **6.5.7 Vergleich: Ring und kleines Kreuz**

Ein weiteres Ziel der Studie war, zu untersuchen, ob der Ring den Testpersonen half eine stabilere Fixation zu erreichen und sie in die Lage versetzte, die Fovea im Zentrum des Gesichtsfeldes zu positionieren.

Der Vergleich der Größe und Lage der gemessenen Skotome sollte Aufschluss darüber geben, wie sich der Ring auf die Messung auswirkte. Dazu wurden die mit dem Ring gemessenen Skotome, mit den Skotomen verglichen, die mit Hilfe des kleinen Kreuzes ermittelt wurden.

Wenn der blinden Fleck auffindbar war, wurde er als Referenzskotom genutzt, um

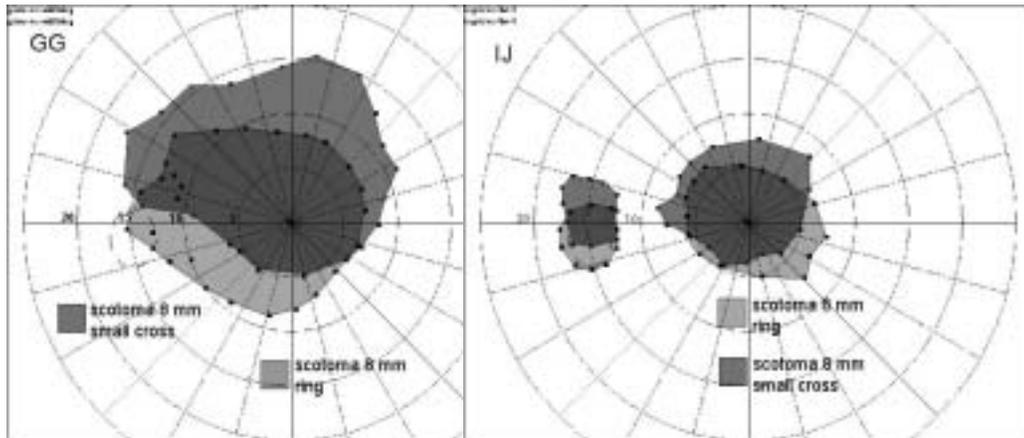
die Verschiebung der Fovea zu beurteilen.

Da die Messung mit dem kleinen Fixationskreuz in der Regel nur beim dominanten Auge durchgeführt worden war, konnten nur 18 Augen in die Auswertung mit einbezogen werden.

In den meisten Fällen traten keine signifikanten Unterschiede bei der Größe und Lage der Skotome auf. Im Vergleich zwischen Ring und kleinem Fixationskreuz fällt auf, dass sich in 55,56% der überprüften Augen die Lage des Skotoms weniger als 2° voneinander unterschied. In 27,78% lag die Verschiebung des Skotoms bei ca. 2°. Nur bei den Testpersonen GG, LH und IJ waren stärkere Abweichungen der Skotomlage feststellbar.

In Abbildung 28 ist das Gesichtsfeld des linken Auges von GG zu sehen. Der Vergleich zwischen Ring und kleinem Fixationskreuz zeigt eine Verschiebung des Zentralskotoms von 5°. Das Skotom verlagerte sich bei der Messung mit dem kleinem Fixationskreuz nach oben.

Eine Verschiebung von 3° lag bei Testperson IJ vor, wie in Abbildung 29 erkennbar. Dort war nicht nur die Verschiebung des Zentralskotoms sondern auch des blinden Flecks zu erkennen. Dadurch konnte bei IJ eindeutig nachgewiesen werden, dass die Verschiebung des Skotoms bei der Nutzung des Rings geringer war. Mit Hilfe des Rings war IJ in der Lage die Fovea zentral zu positionieren.



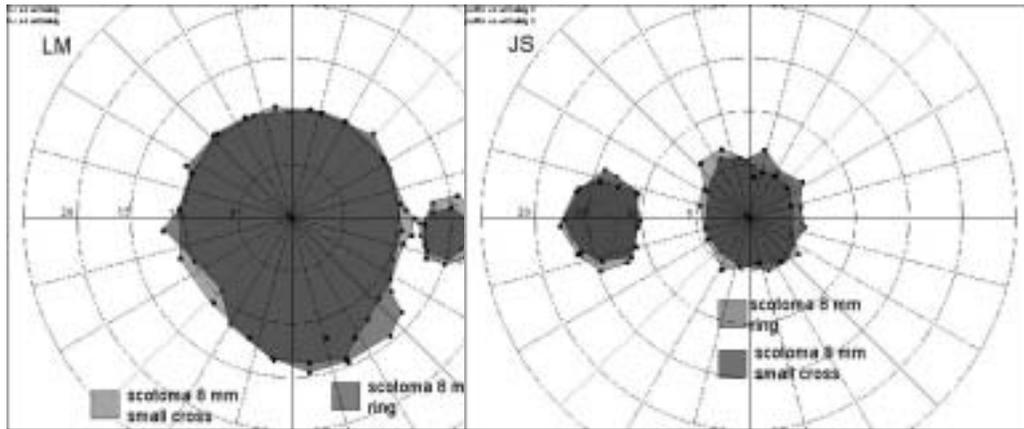
**Abbildung 28: Gesichtsfeld des linken Auges von GG, Ring/kleines Kreuz**      **Abbildung 29: Gesichtsfeld des linken Auges von IJ, Ring/kleines Kreuz**

Im Vergleich zur Messung mit dem kleinen Fixationskreuz führte die Verwendung des Rings bei LH, IJ und GG zu einer zentraleren Lage der Fovea im Gesichtsfeld.

Die Abbildungen 30 und 31 zeigen die Gesichtsfelder der Testpersonen LM und JS. Bei diesen Testpersonen war die Lage der gemessenen Skotome identisch. Die Nutzung des Rings brachte keine Verbesserung zum kleinen Fixationskreuz. Nicht nur die Lage der Skotome stimmte überein, die Skotome besaßen bei LM und JS auch die gleiche Größe.

Der Vergleich der Skotomdurchmesser ergab, dass diese nicht grundsätzlich identisch waren. Nur in 50% der überprüften Augen war die Größe des Skotoms relativ gleich. Ob nun das kleine Kreuz oder der Ring als Fixationsmarke fungierte, änderte in diesen Fällen nichts an der Größe des ermittelten Zentralskotoms.

In 27,78% der Augen war dagegen das ermittelte Skotom mit dem Ring größer. Der Größenunterschied zwischen Ring und Kreuz war aber nie größer als 4°.

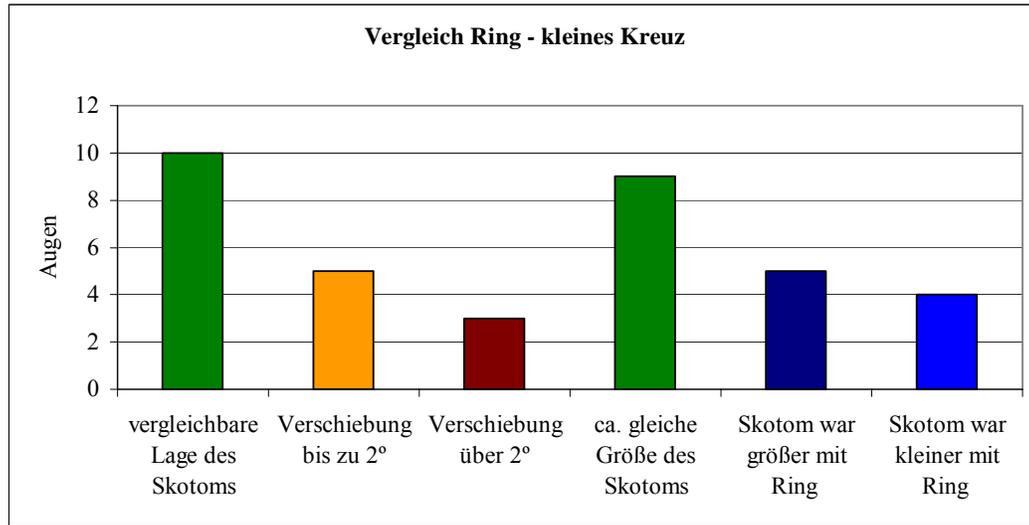


**Abbildung 30: Gesichtsfeld des rechten Auges von LM, großes Kreuz/Ring**      **Abbildung 31: Gesichtsfeld des linken Auges von JS, großes Kreuz/Ring**

In 22,22% war das mit dem Ring gemessene Skotom kleiner. Die Differenz betrug hier ebenfalls nie mehr als 4°. Ob der Ring zu einer genaueren Bestimmung der Skotomgröße führte, war nicht zu ermitteln.

Beim Vergleich der Größe und Lage der Zentralskotome lässt sich zusammenfassend feststellen, dass der Ring keine signifikanten Unterschiede zum kleinen Fixationskreuz zeigte.

Des Weiteren wurde bei der Messung mit dem Ring besonders auf die Lage des blinden Fleckes geachtet, um beurteilen zu können, ob die Fovea sich während der Messung mit dem Ring im Zentrum des Gesichtsfelds befand oder ob eine Verschiebung der Fovea und somit auch des blinden Fleckes vorlag.



**Diagramm 9: Vergleich der Lage und Größe der Skotome, ermittelt mit dem Ring und dem kleinen Fixationskreuz**

In zwölf Augen war der blinde Fleck im Skotom eingebettet. Daher konnte er in diesen Fällen nicht als Referenzskotom dienen. Es konnte nicht eindeutig beurteilt werden, ob der Proband mit Hilfe des Rings „zentral“ fixierte. Wenn die Verschiebung des Zentralskotoms als Indikator diente, war tendenziell erkennbar, dass der Ring dazu führte, dass die Zentralskotome eine zentralere Lage aufwiesen.

Abbildung 32 veranschaulicht exemplarisch das Ergebnis bei Testperson IP. Auffällig war, dass in dem Teil des Gesichtsfeldes, an dem sich normalerweise der blinde Fleck befinden sollte, kein Gesichtsfeldausfall feststellbar war. Um wie viel der blinde Fleck verschoben wurde, war nicht zu ermitteln, da er sich im Skotom befand. Daher wurde der Abstand zwischen Skotomgrenze und der physiologisch richtigen Lage des blinden Flecks als Hilfsgröße genutzt, um die Mindestverschiebung zu ermitteln. Die Lage des Zentralskotoms lässt vermuten, dass eine horizontale und eine vertikale Verschiebung auftrat. Die horizontale Verschiebung lag bei mindestens 6°.

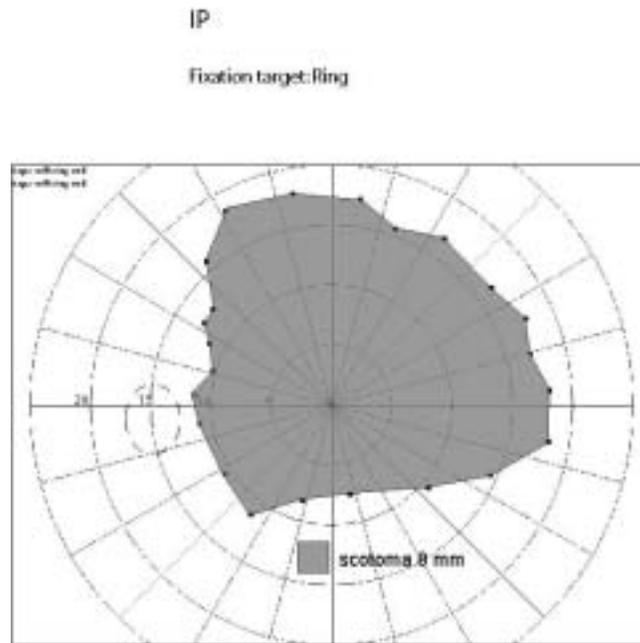


Abbildung 32: Gesichtsfeld des linken Auges von IP, Ring

In 21% der Augen war eine Beurteilung nicht möglich, da der blinde Fleck pathologische Veränderungen aufwies. Ausgehend von der Vermutung, dass die Veränderungen konzentrisch waren, fiel bei PP und KI auf, dass der veränderte blinde Fleck sich während der Messung mit dem Ring annähernd an der richtigen Stelle befand und somit eine annähernd zentrale Lage der Fovea angenommen werden konnte.

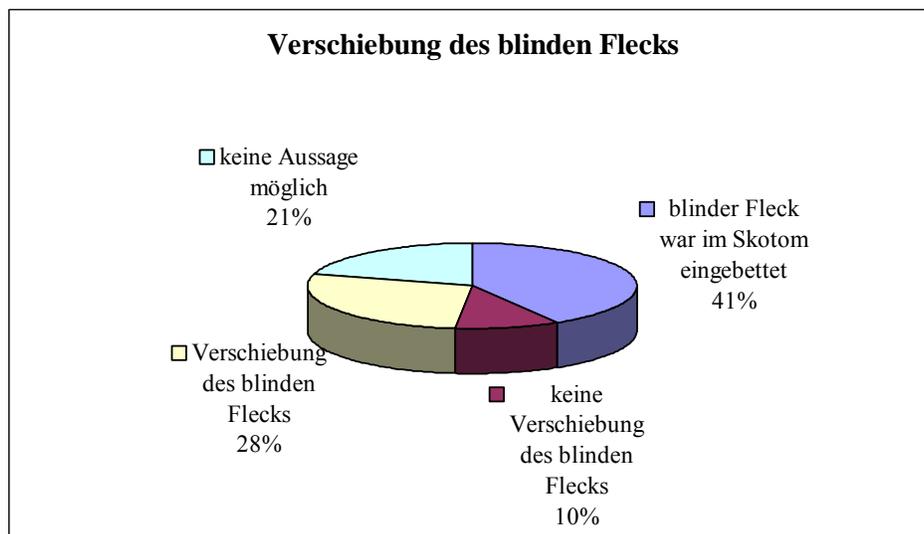


Diagramm 10: Verschiebung des blinden Flecks

In elf Augen konnte der blinde Fleck als Referenzskotom genutzt werden. In acht Augen war eine Verschiebung feststellbar. Sie betrug zwischen  $1^\circ$  und  $3,5^\circ$ . Der Mittelwert lag bei  $2,25^\circ$ .

Bei BB und KI war eine Untersuchung des Gesichtsfeldes mit dem kleinen Fixationskreuz nicht möglich, da die Antworten unzuverlässig waren. Beide Probanden verloren häufig die Fixation. Die Fixation wurde stabiler mit Verwendung des Rings.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass nur in drei Augen der blinde Fleck an der physiologisch richtigen Position auffindbar war. Trotz Ring waren die meisten Testpersonen nicht in der Lage, die Fovea zentral zu positionieren. Auffällig war, dass die Verschiebung der Fixation immer in Richtung der PRL stattfand.

Wenn sich die Lage des Skotoms bei den Messungen mit kleinem Fixationskreuz und Ring unterschied, führte die Nutzung des Rings zu einer zentraleren Positionierung des Skotoms.

#### **6.5.8 Kontrolle des Fixationsverhaltens**

Die direkte Kontrolle der Fixation war aufgrund des Versuchsaufbaus schwierig. Daher wurden die Untersuchungen von B-MF, LH und IJ auf Video aufgenommen, um einen Einblick in das Fixationsverhalten der Testpersonen zu erhalten.

Die Qualität der Aufnahmen war gering, da es während der Untersuchung sehr dunkel war. Man konnte nur Lidschlüsse und auffällige Fixationsverluste erkennen. Deshalb wurden nur die auffälligen Fixationsverluste gezählt und als Kriterium genutzt.

B-MF war vertraut mit Gesichtsfelduntersuchungen. Trotzdem traten bei jeder

Untersuchung Fixationsverluste auf. Beim kleinen Kreuz konnte man davon sieben zählen. Beim Ring und dem großen Fixationskreuz traten jeweils sechs Fixationsverluste auf.

Der Unterschied zum Ring und zum großen Kreuz bestand darin, dass B-MF mit dem kleinen Fixationskreuz länger brauchte, um die Fixation wiederzufinden.

LH war im Gegensatz zu B-MF nicht so erfahren mit Gesichtsfelduntersuchungen. Es traten auch mehr Fixationsverluste auf. Er hatte ca. zehn Fixationsverluste während der Untersuchungen mit dem kleinen Kreuz und mit dem Ring. Die Fixation wurde stabiler bei der Untersuchung mit dem großen Kreuz. Dort traten nur fünf offensichtliche Fixationsverluste auf.

Bei Testperson IJ wurden im Verlauf der Erkrankung mehrere Gesichtsfeldüberprüfungen durchgeführt. Während der Untersuchungen mit allen Fixationsmarken war IJ in der Lage, eine fast stabile Fixation aufrechtzuerhalten. Sie verlor die Fixation fünfmal während der Messung mit dem kleinen Kreuz und dreimal während der Messung mit dem Ring.

Es fiel auf, dass IJ lange brauchte, um das exzentrische Fixationsarael zu finden, mit dem sie das große Kreuz am besten fixieren konnte. Während der Messung mit dem großen Kreuz verlor sie fünfmal die Fixation.

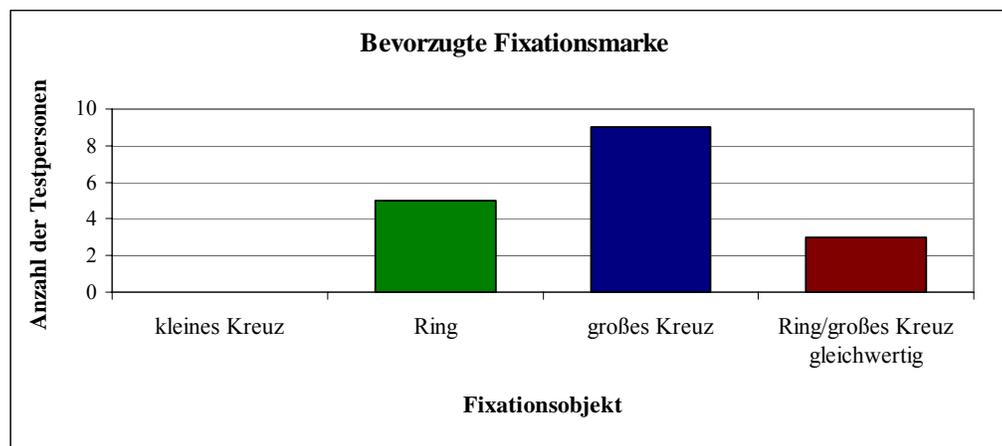
Somit lässt sich zusammenfassend feststellen:

Vergleicht man die Fixationsstabilität während der Messungen mit den drei Fixationsmarken, führte der Ring zu keiner signifikanten Verbesserung der Fixationsstabilität. Vermutlich wirkte der Ring sich eher so aus, dass er den Testpersonen half, die Fixation nach einem Fixationsverlust schneller wiederzufinden, wie es bei B-MF erkennbar war. Videoaufzeichnungen von weiteren Testpersonen wären notwendig, um diese Vermutung bestätigen zu können.

### 6.5.9 Subjektive Einschätzungen der Testpersonen

Nach der Untersuchung wurde jede Testperson gefragt, welche die für sie beste Fixationsmarke war und weshalb. Es wurde besonders darauf eingegangen, ob der Ring im Vergleich zum kleinen Fixationskreuz die Messung vereinfachte.

Alle 17 Testpersonen empfanden die Messung mit dem kleinen für sie nicht sichtbaren Fixationskreuz am kompliziertesten. Sie beschrieben, dass sie Schwierigkeiten hatten, herauszufinden, wo das Zentrum war und wohin sie ihre Fixation richten sollten. Die Messungen mit dem kleinen Fixationskreuz dauerten in der Regel auch länger als die anderen beiden Messungen. Es kam häufiger vor, dass Punkte wiederholt getestet werden mussten, da die Testpersonen die Fixation verloren.



**Diagramm 11: Bevorzugte Fixationsmarke der Probanden**

Im Vergleich zum kleinen Kreuz bevorzugten alle Testpersonen den Ring. Dabei waren die an dem Ring befestigten Stäbe für 82,35% wichtiger als der Ring selbst.

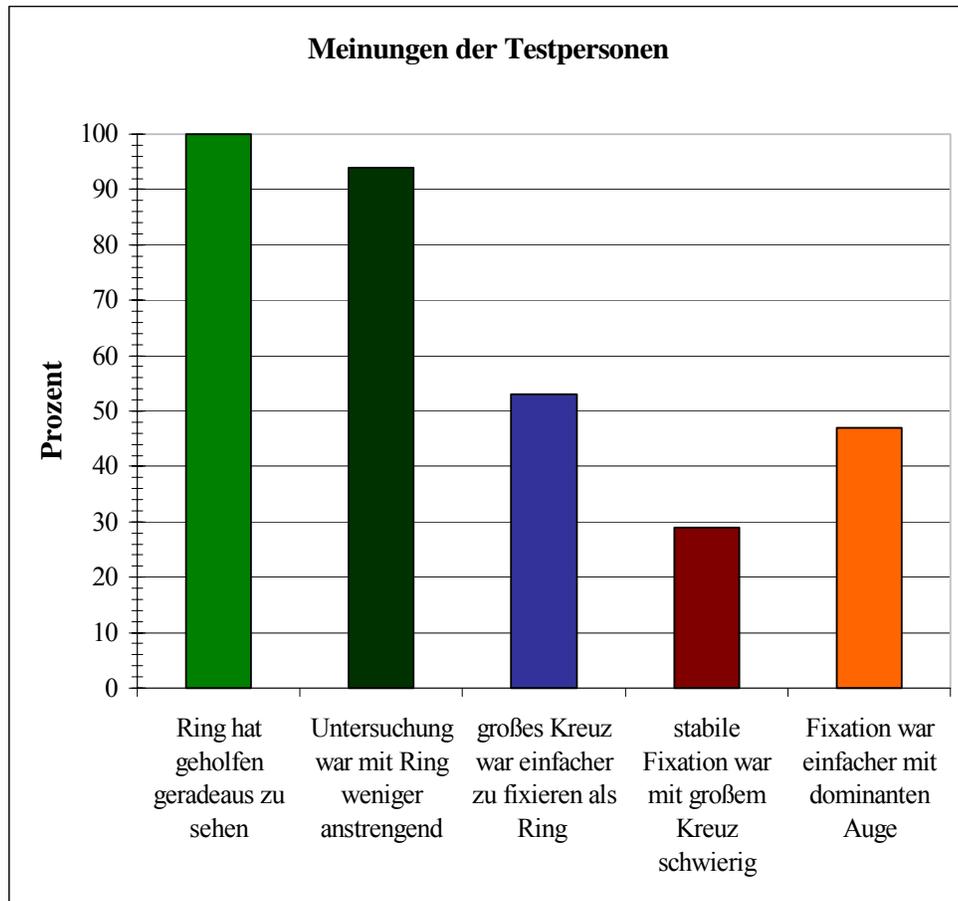
Der Vergleich zwischen Ring und dem großen Fixationskreuz ergab unterschiedliche Meinungen. 52,94% der Testpersonen fanden das große Fixationskreuz am einfachsten. Sie beschrieben, dass es die Untersuchung für sie vereinfachte, eine Fixationsmarke zu haben, auf die sie ihre Fixation direkt richten konnten.

29,41%, zu denen alle drei Testpersonen mit einer Erkrankung des Nervus opticus gehörten, bevorzugten den Ring als Fixationsmarke. Sie empfanden das große Fixationskreuz als komplizierter, da es ihnen schwer fiel, eine stabile exzentrische Fixation aufzubauen.

Bei der Bewertung durch die Probanden schnitt der Ring grundsätzlich positiv ab. Alle Probanden empfanden den Ring als eine Unterstützung, um eine Vorstellung davon zu bekommen, wo das Zentrum der Testfläche war. Der Ring half ihnen ebenfalls in diese Richtung zu sehen. Die Untersuchung wurde mit Hilfe des Rings subjektiv einfacher und weniger anstrengend.

Acht von 17 Testpersonen berichteten, dass die Untersuchung mit dem großen Kreuz unterschiedlich schwer war in beiden Augen. Es fiel ihnen mit dem dominanten Auge leichter die PRL zu finden und auch zu nutzen.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass der Ring nach dem subjektiven Empfinden der Testpersonen eine Hilfe darstellte. Dennoch bevorzugten über die Hälfte das große Kreuz. Es fiel ihnen einfacher eine zentrale Fixationsmarke direkt mit ihrer PRL zu fixieren, als den Ring, der sich in der Peripherie befand, als Richtungshinweis zu nutzen.



**Abbildung 33: subjektive Bewertung der Fixationsmarken**

## 6.6 Diskussion

Die vorliegende Studie zeigte, dass das Auto-Plot-Perimeter zur Erfassung von zentralen Gesichtsfeldausfällen ebenso gut geeignet war wie das Goldmann-Perimeter, da der Vergleich der Skotomgrößen keinen signifikanten Unterschied erbrachte. Dafür spricht auch, dass in den meisten Fällen nicht nur die Größe, sondern auch die Form der Skotome übereinstimmte. Das Auto-Plot-Perimeter kann somit als eine zuverlässige perimetrische Methode angesehen werden.

In 92,86% der Augen mit einer Erkrankung der Netzhaut konnte kein signifikanter Unterschied des Skotomdurchmessers bei Nutzung verschiedener Stimulusgrößen gefunden werden. Das deutet darauf hin, dass absolute Skotome vorlagen. Bei den

meisten Netzhauterkrankungen lag demnach ein kompletter Zapfenausfall vor. Allerdings führen Netzhauterkrankungen nicht grundsätzlich zu einem totalen Zapfenausfall. Ein Großteil der Testpersonen in der vorliegenden Studie litt an einer hereditären Makuladystrophie, die sich über viele Jahre manifestiert hatte.

Das Auto-Plot-Perimeter beschränkt sich im Gegensatz zum Goldmann-Perimeter auf das zentrale Gesichtsfeld. Daraus ergibt sich der Vorteil, dass eine genauere Überprüfung dieses wichtigen Gesichtsfeldanteils durchgeführt werden kann.

Darüber hinaus wird die Untersuchungsdauer reduziert, da die Überprüfung auf den zentralen Bereich konzentriert ist. Allerdings ist als Nachteil anzumerken, dass Ausfälle im peripheren Gesichtsfeld nicht erkannt werden.

Ein weiterer Vorteil des Auto-Plot-Perimeters ist, dass der Prüfabstand frei wählbar ist und somit auch der Gesichtsfeldanteil, der getestet werden kann. Der meistens verwendete Abstand von einem Meter kann bei Bedarf wie z.B. bei Vorliegen größerer Skotome verkleinert werden.

Nicht nur der Prüfabstand kann an den Probanden angepasst werden. Das Auto-Plot-Perimeter besitzt ebenfalls eine größere Flexibilität als das Goldmann-Perimeter hinsichtlich der Stimuli, deren Präsentation, der Hintergrundleuchtdichte und der verwendeten Fixationsmarken.

Das Auto-Plot-Programm ist einfach zu bedienen und kann an jedem PC installiert werden. Die Testergebnisse und die verwendeten Parameter werden nach jeder Messung automatisch gespeichert. Die Durchführung von Verlaufskontrollen wird so vereinfacht. Es benötigt außerdem nur zwei herkömmliche Monitore und ist daher eine preisgünstige Alternative zum Goldmann-Perimeter.

Um das Auto-Plot-Perimeter effektiver nutzen zu können, sollten einige Veränderungen an dem Programm vorgenommen werden. Erstens ist dabei zu nennen, dass dem Untersucher ermöglicht werden sollte, verschiedene Stimuli während einer Messung zu verwenden. Zur Zeit muss das Programm verlassen werden, wenn man z.B. die Größe des Stimulus verändern möchte. Dadurch wird die

Untersuchung unnötig in die Länge gezogen.

Zweitens sollte der blinde Fleck ins Prüfgitter mit aufgenommen werden, um eine Verschiebung sofort zu erkennen. Die Möglichkeit die ermittelten Skotome schon während der Messung hervorzuheben z.B. durch eine Schraffur, würde das Auto-Plot-Perimeter weiter verbessern.

Die große Flexibilität des Auto-Plot-Perimeters ermöglichte verschiedene Fixationsmarken einzusetzen, zu denen auch ein großes Fixationskreuz zählte. Bei der Untersuchung mit dem großen Fixationskreuz sollte die Testperson ihre PRL benutzen. Die Ergebnisse der vorliegenden Studie zeigen, dass mit dieser Meßmethode das bevorzugte exzentrische Fixationsareal auffindbar war.

Der Vergleich der Ergebnisse des Auto-Plot-Perimeters mit denen des Power Refraktors ergab keine signifikanten Abweichungen der ermittelten exzentrischen Fixationswinkel. Die Fixationsrichtung stimmte in 88,24% der untersuchten Augen überein. Bei beiden Messungen benutzten die Testpersonen demnach die annähernd gleiche Netzhautstelle zur Fixation. Die Übereinstimmung der Ergebnisse bestätigte, dass beide Methoden geeignet sind, die Lage des exzentrischen Fixationswinkels zu bestimmen. Somit waren mit dem Auto-Plot-Perimeter nicht nur Aussagen über die Lokalisation und Größe des Zentralskotoms möglich, sondern es konnten auch Erkenntnisse über das Fixationsverhalten der Betroffenen gewonnen werden.

Auffallend war, dass eine unterschiedliche Entwicklung des Fixationsverhaltens auftrat, die offensichtlich der Art des Zentralskotoms zuzuschreiben war. Testpersonen mit einem tiefen absoluten Zentralskotom entwickelten eine PRL, die sich an einem fest definierten Netzhautort befand. Bei Vorliegen eines absoluten Skotoms befand sich die PRL so dicht wie möglich an der Skotomgrenze. Es konnte ein enger Zusammenhang zwischen Flächenausdehnung des Skotoms und der Lage des Fixationsareals beobachtet werden.

Dass die Tiefe des Skotoms ebenfalls einen Einfluss auf die Lage des Fixationsareals hatte, zeigte der Vergleich mit den Testpersonen, die ein relatives Zentralskotom

aufwiesen. Sie nutzten Fixationsareale, die weiter entfernt von der ermittelten Skotomgrenze lagen. Es fiel ihnen auch schwerer eine stabile exzentrische Fixation aufrechtzuerhalten. Alle drei Testpersonen mit einer Erkrankung des Nervus opticus gehörten zu dieser Gruppe.

Mehlhorn [38] fand in seiner Studie ebenfalls heraus, dass eine Erkrankung des Nervus opticus zu Schwierigkeiten bei den Betroffenen führte, den exzentrischen Fixationspunkt einzustellen. Als Erklärung gab Mehlhorn an, dass das Ausmaß der Schädigung im Nervus opticus dafür verantwortlich ist. Je mehr Faserbündel betroffen sind, desto schwieriger kann ein optimaler Fixationspunkt eingestellt werden.

Vermutlich führt ein relatives Skotom dazu, dass die Betroffenen mehrere Fixationsareale nutzen. Diese werden in Abhängigkeit von den jeweiligen Bedingungen wie z.B. Sehaufgabe oder vorhandene Leuchtdichte eingesetzt. Deshalb kommt es nicht zur Ausbildung einer einzigen stabilen PRL. Die Testperson KI ist ein gutes Beispiel dafür. Die meist genutzte exzentrische Fixationsrichtung, die auch mit dem Auto-Plot-Perimeter ermittelt wurde, liegt bei ca. 7-10° nach oben. Wenn er fernsieht, schaut er dagegen 12-15° nach links.

Interessant ist auch die Beobachtung, dass die Prüfgeschwindigkeit bei den Testpersonen mit einer Optikopathie reduziert werden musste, da sie sehr empfindlich auf Bewegungen reagierten. Höchstwahrscheinlich würde eine statische Methode andere Ergebnisse erzielen.

In der vorliegenden Studie wurde eine Bevorzugung der Verschiebung des Zentralskotoms und somit auch des blinden Flecks in das obere Gesichtsfeld gefunden. Dieses Ergebnis stimmt mit vielen Studien, die über das Fixationsverhalten bei Vorliegen eines Zentralskotoms durchgeführt wurden, überein. Ein solches Fixationsverhalten zu entwickeln, macht theoretisch Sinn, da der Gesichtsfeldanteil oberhalb der Fixation für alltägliche Sehaufgaben weniger wichtig ist.

Ein Ziel der vorliegenden Studie war es auch, zu untersuchen, ob die Testpersonen mit Hilfe eines in der Peripherie lokalisierten Rings eine „zentrale Fixation“ während der Messung erreichten. Der blinde Fleck wurde als Referenzskotom eingesetzt, um die Verschiebung der Fovea zu beurteilen. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass die Fovea in den meisten Fällen nicht mit dem Zentrum der Testfläche korrespondierte. Der Ring führte demzufolge nicht zu einer „zentralen Fixation“. Diese war in der Regel in Richtung der PRL verschoben.

Um den genauen Einfluss des Rings zu bestimmen, wurden die Testergebnisse des kleinen Fixationskreuzes mit denen des Rings verglichen. Der Vergleich zeigt deutlich, dass in Bezug auf Größe und Lage der Skotome keine signifikanten Unterschiede auftraten. Wenn ein Unterschied feststellbar war, führte der Ring zu einer zentraleren Lage des Skotoms.

Der Ring führte somit zu keiner signifikanten Beeinflussung der Messergebnisse. Eine mögliche Erklärung dafür könnte sein, dass eine plane Testfläche verwendet wurde. Dadurch war die Begrenzung der Fläche für die Probanden sichtbar und sie konnten sich so möglicherweise orientieren, um den Mittelpunkt der Testfläche zu finden. Um diese Theorie zu bestätigen, müssten Messungen mit einem Halbkugelperimeter als Vergleich herangezogen werden.

Um den Einfluss der einzelnen Fixationsmarken auf das Fixationsverhalten besser beurteilen zu können, wurden von drei Testpersonen Videoaufnahmen gemacht. Diese zeigten ebenfalls keine signifikante Verbesserung des Fixationsverhaltens bei der Verwendung des Rings. Der Ring schien sich bei einer Testperson nur so auszuwirken, dass nach einem Fixationsverlust schneller zu einer Fixation zurückgefunden wurde.

Die Auswertung des subjektiven Empfindens der Testpersonen deutet dagegen daraufhin, dass der Ring einen positiven Einfluss auf die Messung genommen hat. Alle Testpersonen empfanden die Messung mit dem Ring einfacher und weniger anstrengend als die Messung mit dem kleinen Fixationskreuz.

Auffallend war, dass 52,94% der Testpersonen das große Kreuz als Fixationsmarke bevorzugten. Sie beschrieben, dass es ihnen einfacher fiel, eine große für sie sichtbare Fixationsmarke direkt mit ihrer PRL zu fixieren. Der Ring in der Peripherie war zwar eine Richtungshilfe, aber es fiel ihnen trotzdem schwer einen Punkt zu fixieren, den sie nicht sehen konnten.

Dies legt nahe, dass die Messung mit dem großen Fixationskreuz eher dem natürlichen Sehen der Betroffenen entspricht, da sie auch unter normalen Bedingungen exzentrisch fixieren. Dafür spricht auch, dass einige Testpersonen mit dem dominanten Auge das große Fixationskreuz bevorzugten, im Folgeauge dagegen der Ring als einfacher empfunden wurde.

Interessanterweise bevorzugten alle drei Testpersonen mit einer Optikopathie den Ring als Fixationsmarke, was ebenfalls dafür spricht, dass es ihnen schwer fiel, eine exzentrische Fixation einzustellen.

## **7. Die exzentrische Korrektur bei zentralen Gesichtsfeldausfällen**

Das Auto-Plot-Perimeter ist ein Teil der Studie über die exzentrische Korrektur bei zentralen Gesichtsfeldausfällen. Da zur Zeit nicht viele Methoden existieren, die eine Messung der Sehfunktion in der Peripherie des Auges ermöglichen, spielt die Perimetrie eine entscheidende Rolle bei der Einschätzung der verbliebenen Sehfunktion.

Die Perimetrie ermöglicht unter anderem eine Einschätzung des Ausmaßes und der Tiefe des Gesichtsfelddefekts. Die vorliegende Studie zeigte aber auch, dass mit geeigneten Fixationsmarken die PRL ermittelt werden kann.

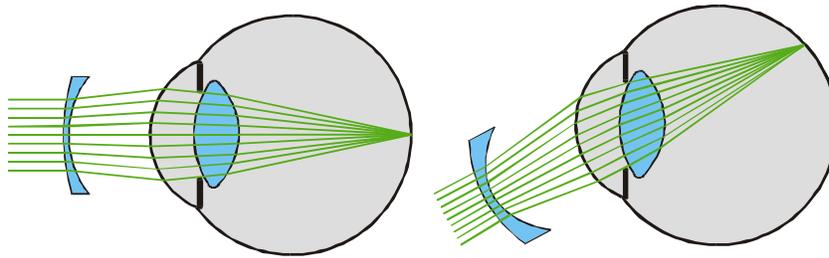
Der periphere Gesichtsfeldanteil ist unschätzbar für Betroffene mit zentralen absoluten Skotomen. Die Fovea mit ihrem hohen Auflösungsvermögen kann dabei nie durch die Netzhautperipherie ersetzt werden. Die Betroffenen können aber durchaus mit vergrößernden Sehhilfen Lesen.

Bis auf die Nutzung von vergrößernden Sehhilfen wurden bisher keine Versuche unternommen, das periphere Sehen optisch zu verbessern, da davon ausgegangen wurde, dass das geringe Auflösungsvermögen der peripheren Netzhaut einen neuronalen Ursprung besitzt und nicht durch die optische Abbildung in der Peripherie bedingt ist.

Dass Betroffene mit zentralen Gesichtsfeldausfällen die periphere Netzhaut nichts desto weniger aktiv nutzen, um sich zu orientieren und Objekte zu erkennen, indem sie eine „Pseudofovea“ entwickeln, wurde durch viele Studien bestätigt. [15]

Das Trainieren der exzentrischen Fixation während des Lesens mit vergrößernden Sehhilfen ist deshalb seit langem Bestandteil der Sehrehabilitation.

Die Studie über die exzentrische Korrektur bei zentralen Gesichtsfeldausfällen beschäftigt sich damit, ob und inwieweit optische Korrekturen das periphere Sehen für die Betroffenen verbessern können.



**Abbildung 34: zentrale und exzentrische Korrektur (mit freundlicher Genehmigung von J. Gustafsson)**

Da die Perimetrie keine ausreichende Genauigkeit für die Überprüfung der exzentrischen Korrektur bietet, müssen zunächst Techniken eingeführt werden, die eine Messung der optischen Aberrationen und der daraus entstehenden optischen Korrektur in Richtung der bevorzugten exzentrischen Fixation ermöglichen. Dieser Aspekt ist besonders wichtig, da die meisten herkömmlichen Tests zur Überprüfung der Sehfunktionen im Bereich der Makula konzipiert wurden.

Herkömmliche subjektive Refraktionsmethoden können z.B. nicht für eine genaue Messung der peripheren Sehfunktion eingesetzt werden, da der Visus in der Peripherie so gering ist, dass der Proband kleine Unterschiede kaum erkennen kann. Dazu kommt, dass er vielleicht nicht in der Lage ist, die PRL über einen längeren Zeitraum zu nutzen.

Die Retinoskopie funktioniert gut bis hin zu  $5^\circ$  Exzentrizität. Bei größeren Winkeln ist sie schwieriger zu nutzen, da die Reflexe schwerer zu interpretieren sind. [4]

Neben Messmethoden müssen optische Korrekturmöglichkeiten entwickelt und eingeführt werden, welche die individuellen peripheren Aberrationen reduzieren. Abschliessend müssen Methoden gefunden und getestet werden, welche die Verbesserungen des peripheren Sehens nach der Korrektur quantifizieren.

Verschiedene Forschungsgruppen haben die außer-axialen optischen Aberrationen des Auges gemessen [40, 21] und es wurden einige wenige Versuche unternommen

die peripheren Aberrationen in gesunden Augen zu korrigieren. Dabei wurden keine oder nur wenige Verbesserungen des peripheren Sehens gefunden.[44]

Die Bewegungswahrnehmung und die Orientierung bildeten die Ausnahmen, da dort Verbesserungen nachweisbar waren. Diese beiden Faktoren scheinen durch die peripheren Aberrationen des Auges limitiert zu sein.[2] Eine mögliche Erklärung lieferten Studien, die zeigten, dass das Wahrnehmungsvermögen stark vom Defokus beeinflusst wird. Das Auflösungsvermögen bei hohen Kontrasten ist dagegen extrem unempfindlich gegen refraktive Unschärfen in der Peripherie. [57]

Durch Einführung der Doppel-Pass-Methode und der Wellenfrontanalyse wurde nachgewiesen, dass die Bildfeldwölbung und der oblique Astigmatismus die dominierenden Aberrationen in der Peripherie des Auges sind. Diese Aberrationen resultieren in einem wirksamen exzentrischen Refraktionsfehler. Der auffälligste Unterschied zur zentralen Refraktion ist deshalb ein induzierter Astigmatismus.

Ein Ziel der Studie ist, zu ermitteln, inwieweit eine exzentrische Korrektur Sinn macht, da nicht davon auszugehen ist, dass das Auflösungsvermögen sich signifikant verbessert.

Das Auflösungsvermögen ist aber nicht die einzige Funktion des peripheren Sehens. Die Bewegungswahrnehmung, Orientierung und die Kontrastempfindlichkeit sind weitere wichtige Funktionen, die durch eine Korrektur der peripheren Aberrationen höchstwahrscheinlich verbessert werden können. Somit könnten die Mobilität der Betroffenen und deren Fähigkeit Gesichter zu erkennen verbessert werden.

Die Ermittlung des Visus bei Betroffenen mit Zentralskotomen weist darauf hin, dass periphere Aberrationen durchaus einen Einfluss auf das Sehen haben, da die subjektive Refraktion oft signifikant andere Ergebnisse bringt als die objektive Refraktion mit Retinoskop oder Autorefraktor.[22]

Eine im Vorfeld durchgeführte Studie des „Low Vision Enabling“ Labors beschäftigte sich mit dem Astigmatismus und dem sphärischen Refraktionsfehler in der Peripherie von 20 gesunden emmetropen Augen [23]. In der Studie wurde die

Doppel-Pass-Methode genutzt, die mit Hilfe einer CCD-Kamera einen Einblick in die periphere Optik des Auges ermöglichte.

Die Studie ergab, dass sogar für zentrale emmetrope Augen große individuelle Schwankungen in der Peripherie auftraten. Bei einem exzentrischen Winkel von  $60^\circ$  traten individuelle Unterschiede des Astigmatismus bis zu 10 dpt auf. Aber auch die Aberrationen höherer Ordnungen nahmen mit der Exzentrizität zu, besonders Koma. Daraus wurde der Schluss gezogen, dass es nicht möglich ist, die exzentrische Korrektur einfach aus der zentralen zu kalkulieren.

Da die Doppel-Pass-Methode langsam und auf Fehler geringer Ordnung begrenzt ist, mussten neue Meßmethoden gefunden werden.

In den folgenden Studien wurde ein Photorefraktionsinstrument genutzt, um Refraktionen außerhalb der optischen Achse zu ermitteln. Im Gegensatz zu gewöhnlichen Refraktometern kann der Power Refraktor (Multi Channel Systems GmbH, Tübingen, Deutschland) schnelle und verlässliche Ergebnisse bis hin zu exzentrischen Winkeln von  $20^\circ$ -  $25^\circ$  liefern. Der maximale Winkel wird durch die Größe der Pupille bestimmt.

Die Verlässlichkeit der Messergebnisse des Power Refraktors wurde durch Choi untersucht. Er stellte fest, dass die Ergebnisse gerade für den Astigmatismus exakt sind, da sie im Durchschnitt nur 0,4 dpt von der subjektiven Refraktion abweichen. [6]

Der Power Refraktor nutzt sechs Infrarotlicht-ausstrahlende Dioden, die in einem Kreis um die Kameralinse montiert sind. Die Dioden leuchten nacheinander auf. Das Licht tritt in das Auge ein, und die Kamera fängt das Bild des retinalen Reflexes auf. Die Software wertet die Beleuchtung der Pupille aus und kalkuliert den refraktiven Fehler. Der Power Refraktor ist nur in der Lage den Astigmatismus und Defokus zu messen. Die Messung findet in Echtzeit statt und erfordert, dass der Proband die Kamera aus einem Meter Entfernung fixiert. Beide Augen werden gleichzeitig gemessen.

Der Power Refraktor wurde in einer Studie des Low Vision Enabling Labors eingesetzt, bei der sieben Testpersonen mit zentralen Gesichtsfeldausfällen untersucht wurden. Dabei wurde die periphere Refraktion im bevorzugten exzentrischen Fixationswinkel gemessen. Da die Testpersonen nicht in der Lage waren, die Kamera direkt zu fixieren, ohne einen exzentrischen Fixationsort zu nutzen, musste eine unterstützende Fixationsmarke entwickelt werden. Sie bestand aus konzentrischen Ringen, die von horizontalen und vertikalen Linien ergänzt wurden. Die Ringe deckten das 50°-Gesichtsfeld ab. Fünf Ringe waren in einem Abstand von je 5° angeordnet. Die entwickelte Fixationsmarke wurde in abgewandelter Form für das Auto-Plot-Perimeter übernommen.

Um das Auge in einer stabilen exzentrischen Fixationsrichtung zu halten, wurden die Testpersonen aufgefordert, in die Richtung zu sehen, die sie normalerweise nutzen, um Objekte zu fixieren.

Wenn eine Testperson das Skotom z.B. 20° nach oben verlagerte, richtete sie den Blick auf die Kreuzungsstelle des vierten Ringes und der oberen vertikalen Linie, die für sie in diesem Moment nicht sichtbar war. Der exzentrische Fixationswinkel wurde durch das Verhältnis zur optischen Achse des Auges ermittelt.

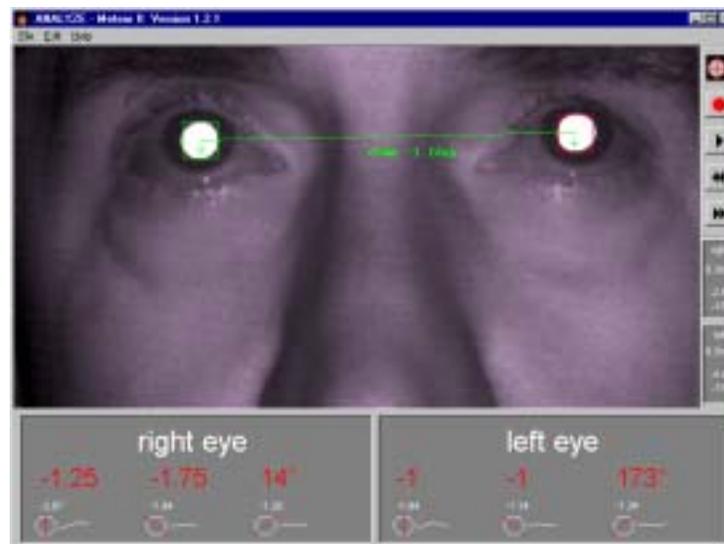
Die Ergebnisse zeigten eine Verlässlichkeit, die eine Korrektur ermöglichten.

Sieben Testpersonen wurden in die Studie aufgenommen. Die durchschnittlichen Werte des Power Refraktors wurden genutzt, um entsprechende torische Brillengläser anzufertigen.



**Abbildung 35: Messung des Power Refraktors bei zentraler Fixation (mit freundlicher Genehmigung von J. Gustafsson)**

Die Abbildungen 35 und 36 zeigen die Power Refraktor Bilder der Testperson KI. In Abbildung 35 versucht die Testperson zentral zu „fixieren“. Neben dem Foto sind die exzentrischen Fixationswinkel angegeben.



**Abbildung 36: Messung des Power Refraktors bei exzentrischer Fixation (mit freundlicher Genehmigung von J. Gustafsson)**

In Abbildung 36 fixiert der Proband exzentrisch, um die Kamera sehen zu können, in diesem Fall  $19^\circ$  nach oben.

Die Veränderung des Astigmatismus zwischen den beiden Fixationorten ist klar erkennbar. Es zeigen sich nicht nur Unterschiede in der Sphäre und der Stärke des Zylinders sondern auch in dessen Achslage.

Um die periphere Sehfunktion vor und nach der Korrektur objektiv zu testen, wurden die Kontrastempfindlichkeit und die Bilderkennungsfähigkeit ermittelt.

Des Weiteren wurde die Ringperimetrie genutzt, da dieses Verfahren eine genauere Angabe der Visusstufen ermöglichte als herkömmliche Methoden. Mit dem von Frisen entwickelten Verfahren kann das lokale Auflösungsvermögen im zentralen Gesichtsfeld bestimmt werden. Als Testzeichen dienen niederfrequenzgefilterte Ringe. Helligkeits- und Kontrastverteilung sind so gewählt, dass die Detektionsschwelle ungefähr mit der Auflösungsschwelle übereinstimmt. [18, 32]

Das wichtigste Resultat dieser Studie war, dass die Einschränkung der Sehfunktion in der Peripherie nicht nur durch neuronale Gegebenheiten zu erklären ist.

Bei geübten Testpersonen mit großen Zentralskotomen und demzufolge auch mit großen exzentrischen Fixationswinkeln wurde eine objektive Verbesserung der Sehfunktion festgestellt. Die Ergebnisse zeigten einen verbesserten Schwellenwert für die Ringperimetrie bei Korrektur des obliquen Astigmatismus und des nicht-axialen sphärischen Refraktionsfehlers. Fünf von sieben Testpersonen zeigten sogar eine signifikante Verbesserung des Visus bis hin zu 50%. Bei 71% der Testpersonen war eine Verbesserung der Kontrastempfindlichkeit feststellbar.

Die ausgewählten Testpersonen waren geübt in der Nutzung der exzentrischen Fixation. Alle sieben Probanden beschrieben eine Verbesserung ihres Sehens nach der Korrektur, besonders in Hinblick auf ihre Mobilität. Fünf Testpersonen beschrieben, dass sie mit der Korrektur besser Fernsehen können. Vier von sieben Testpersonen gaben an, dass sie mit der Korrektur Gesichter besser erkennen. [24]

Ein Nachteil des Power Refraktors war, dass die Pupillengröße nicht kontrolliert oder registriert werden konnte. Die Pupillengröße nimmt aber starken Einfluss auf das Ergebnis. Je größer die Pupille, desto verschwommener ist das optische Bild bei einer gegebenen Ammetropie.

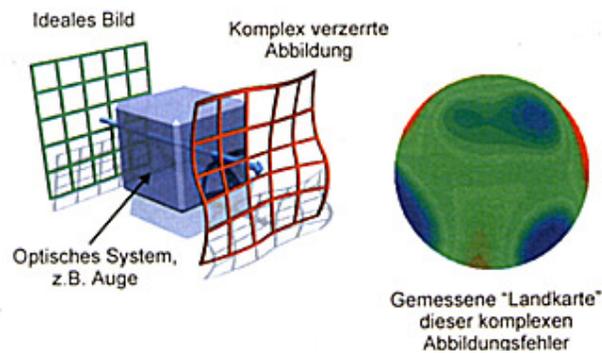
Eine weitere Beschränkung des Power Refraktors lag darin, dass Fehler höherer Ordnung nicht gemessen werden konnten. Neben dem Astigmatismus reduzieren auch andere Aberrationen, vor allem Koma, die periphere optische Qualität. Diese Aberrationen sind schwierig zu messen und zu korrigieren, sie können aber beträchtlichen Einfluss haben. Wenn z.B. der Anteil der Koma groß ist, werden die Power Refraktor Messungen unzuverlässig.

Um ein völliges Verständnis der peripheren Aberrationen zu erhalten, wurde ein Hartmann-Shack-Sensor gebaut, der Messungen sogar in Winkeln größer als  $25^\circ$  ermöglicht.

Die optischen Abbildungseigenschaften des Auges lassen sich vollständig durch die Wellenfrontaberration in der Ebene der Eintrittspupille des Auges beschreiben. Bei einer optischen Abbildung wird eine ideal ebene "Wellenfront" durch ein reales optisches System – das menschliche Auge – sehr komplex verzerrt.

Die Wellenfrontaberration enthält dabei Informationen über den Refraktionsfehler des Auges aber auch über Aberrationen höherer Ordnung, die erst durch eine orts aufgelöste Wellenfrontvermessung feststellbar sind. [41]

Die Größe und Form der Wellenfrontaberration ist stark abhängig vom gewählten Netzhautort. Es treten zusätzliche Aberrationen auf, wenn das Laserlicht in einem schrägen Winkel auf einen Netzhautort außerhalb der Makula gerichtet ist.



**Abbildung 37: Wellenfrontaberration**

Betrachtet man mit einem realen optischen System eine Punktlichtquelle, so sieht man einen entsprechend den optischen Aberrationen verschmierten bzw. verbreiterten Punkt („point spread function“). Diese Punktverbreiterung resultiert aus der räumlichen Übertragungseigenschaft des optischen Systems, der sogenannten optischen Modulationsübertragungsfunktion („modulation transfer function“ – MTF).[8]

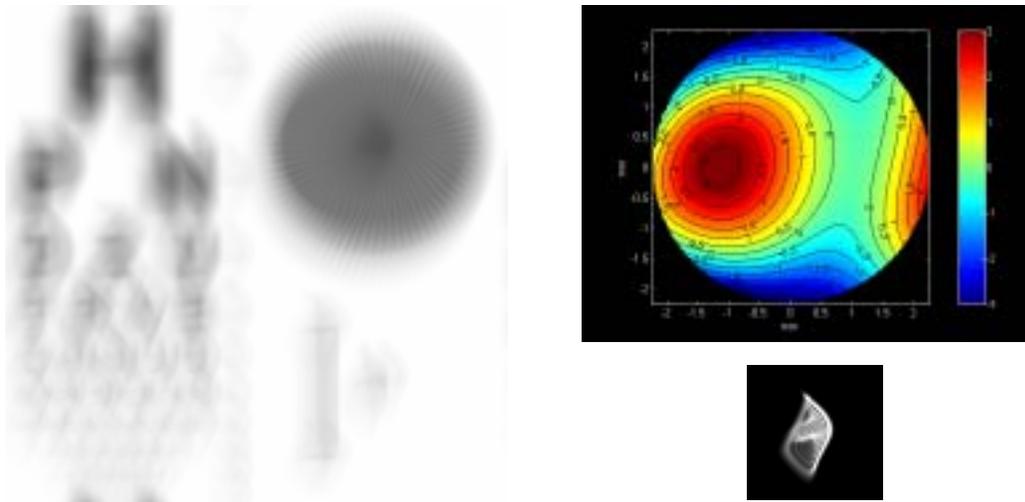
Einfache Fehler wie Kurz- oder Weitsichtigkeit haben eine einfache, schüsselförmige symmetrische Verzerrung zur Folge. Aberrationen höherer Ordnung erzeugen dagegen komplexe, unsymmetrische Verzerrungen der ursprünglich ebenen Wellenfront. Diese Verzerrungen sind individuell einzigartig.

Die neue Wellenfront-Messtechnik macht es möglich, selbst kleine Abbildungsfehler des Auges höherer Ordnung mit Hilfe einer objektiven und quantitativen Prozedur zu messen.

Für die Untersuchung des menschlichen Auges wird ein Laserlicht mit geringer Energie auf die Netzhaut gerichtet, von hier reflektiert und durch Linse und Hornhaut wieder nach außen projiziert. Im Aberrometer wird dieser Lichtstrahl oder diese Wellenfront durch ein Linsen-Array-System auf einen CCD-Sensor abgebildet. Dieser Sensor bildet die durch Aberration "verzogene" Wellenfront als Gitternetz mit unterschiedlichen Intensitäten ab. Diese Abweichungen von der Idealdarstellung werden dann gemessen.

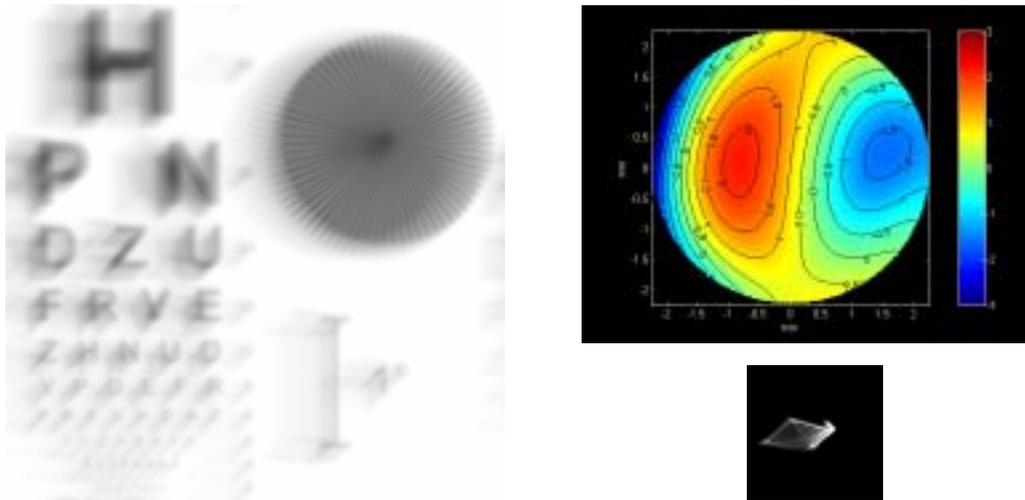
Der Physiker Zernicke führte in den 40er Jahren des vergangenen Jahrhunderts ein Qualifizierungs- (Polynome) und Quantifizierungssystem (Koeffizienten) ein, mit dem eine Ordnung der Aberrationen ermöglicht wurde. Diese sehr komplexen Polynome haben sich in der technischen Optik und bereits auch in der physiologischen Optik durchgesetzt.[41]

Zur Zeit werden Wellenfrontmessungen bei verschiedene Testpersonen mit zentralen Gesichtsfeldausfällen durchgeführt. Die Ergebnisse sollen mit denen des Power Refraktors verglichen werden. Die Messungen zeigen in einigen Fällen einen großen Anteil von Koma, Trefoil und sphärischer Aberration, der durch den Power Refraktor nicht erfasst werden konnte.



**Abbildung 38: Wellenfrontanalyse mit zentraler Korrektur (mit freundlicher Genehmigung von J. Gustafsson)**

Abbildung 38 zeigt rechts oben die Wellenfrontaberration, links die korrespondierende retinale Bildqualität und rechts unten die „point spread function“ der Testperson MG. Es handelt sich in diesem Fall um die zentrale Korrektur von  $-3,75$  dpt.



**Abbildung 39: Wellenfrontanalyse mit exzentrischer Korrektur (mit freundlicher Genehmigung von J. Gustafsson)**

Die Abbildung 39 zeigt rechts oben die Auswirkungen der exzentrischen Korrektur auf die Wellenfront. Die retinale Bildqualität hat sich mit der exzentrischen Korrektur verbessert. In beiden Fällen reduziert nach der Korrektur des Defokus und des Astigmatismus vor allem Koma die Bildqualität. Die „point spread function“ zeigt ebenfalls signifikante Veränderungen.

Die genutzte exzentrische Fixation lautete: sph: -2,0 dpt cyl -3,0 dpt A 90°.

Die Wellenfrontdaten sollen in Zukunft als Grundlage für die Berechnung der besten exzentrischen Korrektur dienen.

Die bisher durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass Betroffene mit zentralen Gesichtsfeldausfällen, die nur eine Richtung für die exzentrische Fixation nutzen, diejenigen sind, die am meisten von einer besseren Bildqualität außerhalb der Makula profitieren können.

Der induzierte Astigmatismus in der Peripherie kann durch die Nutzung gewöhnlicher Brillengläser korrigiert werden. In Zukunft sollen Contactlinsen

genutzt werden, da diese sich mit dem Auge bewegen und somit eine akkuratere Korrektur der Aberrationen ermöglichen würden. Contactlinsen mit individuell angepassten asphärischen Oberflächen sollen verwendet werden, um sogar Koma und andere Fehler höherer Ordnung zu korrigieren.

Diese bisher auf einige wenige Testpersonen limitierte Studie zeigt, dass es wichtig ist, die Unterschiede zwischen zentraler und exzentrischer Refraktion/Korrektur zu beachten. Individuelle Schwankungen in der peripheren Refraktion und die im Moment übliche Nutzung der zentralen Korrektur können zu signifikanten refraktiven Fehlern in der zur Fixation bevorzugten exzentrischen Netzhautstelle führen. Das wiederum kann das Sehen negativ beeinflussen. Um die Ergebnisse der Studie zu bestätigen, müsste eine größere Anzahl von Testpersonen gemessen und korrigiert werden.

Ein weiterer wichtiger Punkt liegt in der Entwicklung von präziseren Meßmethoden, die eine Bewertung der Sehfunktion außerhalb der Makula ermöglichen.

Die Wellenfrontaberrometrie ist ein Schritt in diese Richtung.

Die exzentrische Korrektur kann die Nutzung von vergrößernden Sehhilfen nicht ersetzen, da die Dichte der Zapfen als auch der Ganglienzellen bei höheren Exzentrizitäten stark abnimmt. Dadurch sinkt gleichzeitig die Qualität der retinalen Verarbeitung. Die Sehrinde verarbeitet das periphere Netzhautbild außerdem anders als das foveale Netzhautbild. Diese neuronalen Vorgaben führen zu einer oberen Grenze des erreichbaren peripheren Visus.

Die exzentrische Korrektur soll die Nutzung von vergrößernden Sehhilfen eher unterstützen, in dem sie unter anderem eine bessere Fixation ermöglicht. Ob die exzentrische Korrektur den Betroffenen helfen kann ihre „Pseudofovea“ zu finden und aktiv zu nutzen, wird in weiterführenden Studien überprüft werden.

Mehrere Testpersonen aus einer größeren Gruppe von 38 Testpersonen waren nach der Untersuchung in der Lage, eine bessere Fixation zu finden und dadurch ihr verbliebenes Sehen besser zu nutzen.

Die Verbesserung der Kontrastempfindlichkeit ist ein weiterer Aspekt, der eine Nutzung der exzentrischen Korrektur wünschenswert macht, da sie im alltäglichen Leben eine wichtige Rolle spielt.

Die weiterführenden Untersuchungen werden Aufschluss darüber geben, ob die exzentrische Korrektur nur einigen wenigen oder vielen Betroffenen mit zentralen Gesichtsfeldausfällen helfen kann, ihr verbliebenes Sehen so gut wie möglich zu nutzen.

## 8. Ausblick

Aufgrund des zeitlichen Rahmens der Arbeit konnte nur eine kleine Anzahl von Testpersonen untersucht werden. Die Ergebnisse zeigen daher nur Tendenzen auf. Eine größere Anzahl von Testpersonen ist nötig, um die Ergebnisse zu verifizieren. Des Weiteren müssten Probanden mit anderen Ausgangskriterien mit einbezogen werden. Die vorliegende Studie war auf Probanden beschränkt, deren Erkrankung sich über einen längeren Zeitraum manifestiert hatte. In der Regel lagen auch große Skotome vor. Inwieweit die Ergebnisse für andere Probandengruppen zutreffen, müsste ebenfalls durch weiterführende Studien geklärt werden.

Das computerisierte Auto-Plot-Perimeter ist eine gute und kostengünstige Alternative zum Goldmann-Perimeter. Es ist als kinetische Methode besonders gut geeignet die subjektiven Einschränkungen der Testpersonen zu ermitteln. Da es sich nur auf das zentrale Gesichtsfeld beschränkt, erzielt man bei Erkrankungen der zentralen Netzhaut und des Nervus opticus gute Ergebnisse. Die hohe Flexibilität ermöglicht weiterhin eine vielseitige Einsetzbarkeit. In der vorliegenden Studie konnte mit Hilfe einer vergrößerten Fixationsmarke das exzentrische Fixationsareal bestimmt werden. Somit waren neben einer Bestimmung der Größe und Tiefe der Skotome auch Aussagen über das Fixationsverhalten der Betroffenen möglich.

Nur dem subjektiven Empfinden der Probanden nach war der Ring eine Unterstützung, da er half, in Richtung geradeaus zu fixieren. Die Messergebnisse dagegen zeigen keine signifikante Verbesserung. Die meisten Testpersonen waren auch mit Ring nicht in der Lage „zentral“ zu fixieren. In der Regel trat eine Verschiebung der Fixation in Richtung PRL auf. Interessanterweise bevorzugte die Mehrzahl das große Fixationskreuz, was dafür spricht, dass die direkte Fixation mit der PRL einfacher war als die „zentrale“ Fixation mit dem unterstützenden Ring in der Peripherie.

## 9. Literaturverzeichnis

1. Algvere, P.V.; Seregard, S.: Age-related maculopathy: pathogenetic features and new treatment modalities. In: *Acta Ophthalmol. Scand.* (2002) 80: 136-143
2. Artal, P.; Derrington, A.M.; Colombo, E.: Refraction, aliasing, and the absence of motion reversals in peripheral vision. In: *Vision Research* (1995) 35: 939-947
3. Beitzinger, M.: Klinische Ergebnisse statischer und kinetischer Perimetrie bei Netzhaut-, Sehnerven- und Sehbahnschäden. Inauguraldissertation, Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg, 1996
4. Bennet, A.; Rabbets, R.: Retinoscopy (sciascopy). In: *Clinical Visual Optics* (1989) 411: 342-344
5. Berke, A.: Biologie des Auges, eine Einführung in die Anatomie und Physiologie des Auges. WVAO, Mainz, 1999
6. Choi, M.; Weiss, S.; Schaeffel, F.; Seidemann, A.: Laboratory, clinical, and kindergarten test of a new eccentric infrared photorefractor (PowerRefractor). In: *Optom. Vis. Sci.* (2000) 77:537-548
7. Ciulla, T.A.; Harris, A.; Martin, B.: Ocular perfusion and age-related macular degeneration. In: *Acta Ophthalmol. Scand.* (2001) 79: 108-115
8. Davies, N.; Diaz-Santana, L.; Lara-Saucedo, D.: Repeatability of ocular wavefront measurement. In: *Optometry and Vis. Sci.* (2003) 80:142-150
9. Deruaz, A.; Whatham, A.R.; Mermoud, C.; Safran, A.B.: Reading with multiple preferred retinal loci: implications for training a more efficient reading strategy. In: *Vision Research* (2002) 42: 2947-2957
10. Duret, F.; Issenhuth, M.; Safran, A.B.: Combined use of several preferred retinal loci in patients with macular disorders when reading single words. In: *Vision Research* (1999) 39: 873-879
11. Elsner, H.; Schnmidt-Erfurth, U.: Photodynamische Therapie subfovealer chorioidaler Neovaskularisationen. In: *Ophthalmologie* (2002) 99: 620-624
12. Ergun, E.: Scotoma size and reading speed in patients with subfoveal occult choroidal neovascularization in age-related macular degeneration. In: *Ophthalmology* (2003) 110: 65-69

13. Fine, E.; Peli, E.: Scrolled and rapid visual presentation texts are read at similar rates by the visually impaired. In: Journal of the Optical Society of America (1995) 12: 2286-2291
14. Fine, E.M.; Rubin, G.S.: Reading with simulated scotomas: attending to the right is better than attending to the left. In: Vision Research (1999) 39: 1039-1048
15. Fletcher, D.C.; Schuchard, R.A.: Preferred Retinal Loci Relationship to macular scotomas in a low-vision population. In: Ophthalmology (1997) 104: 632-638
16. Fletcher, D.C.; Schuchard, R.A.; Watson, G.: Relative locations of macular scotomas near the PRL: effect on low vision reading. In: Journal of Rehabilitation Research and Development (1999) 36: 356-364
17. Gandorfer, A.; Ulbig, M.W.; Kampik, A.: Erkrankungen der Retina – Aktuelle Aspekte der Diagnostik und Therapie. 1.Aufl., Uni-Med Verlag, Bremen, 2002
18. Gloor, B.: Perimetrie mit besonderer Berücksichtigung der automatischen Perimetrie. 2.Aufl., Enke Verlag, Stuttgart, 1993
19. Graefe, A.: Über die Untersuchung des Gesichtsfeldes bei amblyopischen Affektionen. In: Arch Ophthalmol. (1856) 2.2: 258-298
20. Guez, J.E.; Le Gargasson, J.F.; Rigaudiere, F.; O'Reagan, K.: Is there a systematic location for the Pseudo-Fovea in patients with central scotoma?. In: Vision Research (1993) 33: 1271-1279
21. Guirao, A.; Artal, P.: Off-axis monochromatic aberrations estimated from double pass measurements in the human eye. In: Vision Research (1999) 39:207-217
22. Gustafsson, J.: Eccentric correction in central visual field loss. Promotionsthema, Certec, Lund, 2001
23. Gustafsson, J.; Terenius, E.; Buchheister, J.; Unsbo, P.: Peripheral astigmatism in emmetropic eyes. In: Ophthal. Pysiol.Opt. (2001) 21: 393-400
24. Gustafsson, J.; Unsbo, P.: Eccentric correction for off-axis vision in central visual field loss. Noch unveröffentlicht, wahrscheinlich in: Optometry and Vision Science
25. Hall, E.C.; Ciuffreda, K.: Eccentric viewing training in macular degeneration using auditory ocular motor biofeedback. In: Journal of Behavioral Optometry (2001) 12:1-7

26. Hammerstein, W.: Dystrophien der Retina. Ein Atlas zur Differentialdiagnose. Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart, 1991
27. Hollwich, F.: Augenheilkunde. Ein kurzes Lehrbuch. 11. neubearbeitete Aufl., Georg Thieme Verlag, Stuttgart, 1988
28. Holz, F.G.; Pauleikhoff, D.(Hrsg.): Altersabhängige Makuladegeneration. Springer Verlag, Berlin, 1997
29. Holz, F.: Neue diagnostische Möglichkeiten bei Makulaerkrankungen. In: Ophthalmologie (2001) 98: 1-2
30. Kabanarou, S.A.; Bellmann, C.; Crossland, M.D.; Culham, L.E.; Rubin, G.S.: Eccentric fixation and binocular viewing in patients with advanced Age-related Macular Degeneration. Arvo-Poster, 2003
31. Kimble, T.; Williams R.: Structure of the cone photoreceptor mosaic in the retinal periphery of adult humans: analysis as a function of age,sex and hemifield. In: Anat Embryol (2000) 201: 305-316
32. Lachenmayr, B.J.; Vivell, P.: Perimetrie. ThiemeVerlag, Stuttgart, 1992
33. Lei, H.; Schuchard, R.A.: Two preferred retinal loci for different lighting conditions in patients with central scotomas. In: Invest. Ophthalmol. Vis. Sci. (1997) 38: 1812-1818
34. Leibowitz, H.W.; Johnson, C.A.; Isabelle, E.: Peripheral motion detection and refractive error. In: Science (1972) 177: 1207-1208
35. Lenz, C.U.: Auswirkungen der altersabhängigen Makuladegeneration auf das zentrale Gesichtsfeld und die Fixation-eine fundusorientierte mikroperimetrische Studie. Inauguraldissertation, Eberhard-Karls-Universität Tübingen, 1995
36. Leo-Kottler, B.; Jacobi, F.; Christ-Adler, M.: Lebersche Optikusneuropathie mit klinischer Besserung. In: Ophthalmologie (2000) 97: 849-854
37. Loewenstein, A.; Malach, R.; Goldstein, M.; Leibovitch, I.: Replacing the Amsler Grid. In: Ophthalmology (2003) 110: 966-970
38. Mehlhorn, U.: Variabilität und Dichte von Zentralskotomen bei Erkrankungen des Nervus opticus und der zentralen Retina unter verschiedenen Adaptationsbedingungen. Inauguraldissertation, Medizinische Akademie "Carl Gustav Carus" Dresden, 1989
39. Meyer, J.H.; Guhlmann, M.; Funk, J.: Hängt der fundusperimetrisch bestimmte Rand des blinden Flecks von der Oberflächenform der Papille ab?. In: Ophthalmologie (1997) 94: 360-363

40. Millodot, M.; Lamont, A.: Refraction of the periphery of the eye. In: J. Opt. Soc. Am. (1974) 64: 110-111
41. Mrochen, M.; Seiler, T.: Grundlagen der wellenfrontgeführten refraktiven Hornhautchirurgie. In: Ophthalmologie (2001) 98: 703-714
42. Nilsson, U.L.; Frennesson, C.; Nilsson, E.G.: Location and stability of a newly established eccentric retinal locus suitable for reading, achieved through training of patients with dense central scotoma. In: Optometry and Vision Science (1998) 75: 873-878
43. Pesudovs, K.; Patel, B.; Bradbury, J.; Elliot, D.: Reading speed test for potential central vision measurement. In: Clinical and Experimental Ophthalmol. (2002) 30: 183-186
44. Rempt, F.; Hoogerheide, J.; Hoogenboom, W.: Influence of correction of peripheral refractive errors on peripheral static vision. In: Ophthalmologica (1976) 173: 123-135
45. Rohrschneider, K.; Glück, R.; Blankennagel, A.: Fixationsverhalten bei Morbus Stargardt. In: Ophthalmologie (1997) 94: 624-628
46. Rohrschneider, K.; Glück, R.; Kruse, F.E.; Völcker, H.E.: Zur Bestimmung der Lage der Fovea am Fundus. In: Der Ophthalmologe (1998) 95: 706-709
47. Rohrschneider, K.; Bültmann, S.: Funduskontrollierte Funktionsprüfung bei Makulaerkrankungen mit dem Scanning-Laser-Ophthalmoskop. In: Ophthalmologie (2001) 98: 3-9
48. Schiefer, U.; Strasburger, H.; Becker, S.; Vontheim, R.; Schiller, J.; Dietrich, T.J.; Hart, W.: Reaction time in automated kinetic perimetry: effect of stimulus luminance, eccentricity, and movement direction. In: Vision Research (2001) 41: 2157-2164
49. Schuchard, R.A.; Cummings, R.; Ross, D.; Watson, G.: Comparison of SLO perimetry, binocular perimetry, and functional visual field perimetry in patients with macular scotomas. Arvo-Poster 2003
50. Sunness, J.S.; Applegate, C.A.; Haselwood, D.; Rubin, G.S.: Fixation patterns and reading rates in eyes with central scotomas from advanced atrophic Age-related Macular Degeneration and Stargardt Disease. In: Ophthalmology (1996) 103: 1458-1466
51. Timberlake, G.T.; Mainster, M.M.; Peli, E.: Reading with macular scotoma, I. Retinal location of scotoma and fixation area. In: Invest. Ophthalmol. Vis. Sci. (1986) 27: 1137-1147

52. Tornambe,P.; Augustin,A.J.: Makulaforamina. In: Ophthalmologie (2002) 99:601-608
53. Trauzettel-Klosinski, S.; Schäfer, W.D.; Klosinski, G.: Legasthenie, Grundlagen des Lesens, Lese-Rechtschreib-Störung. In: Ophthalmologie (2002) 99: 208-229
54. Volgushev, M.: Sehen: Hauptvorlesung Physiologie. Ruhr-Universität Bochum, 2002
55. Wabbels, B.; Schiefer, U.: Altersabhängige "Fehlerquoten" bei der automatischen Rasterperimetrie mit hellen und dunklen Stimuli. In: Ophthalmologie (1999) 96: 813-821
56. Wabbels, B.; Kolling, G.: Automatische kinetische Perimetrie mit unterschiedlichen Prüfungsgeschwindigkeiten. In: Ophthalmologie (2001) 98: 168-173
57. Wang, Y.Z.; Thibos, L.N.; Bradley, A.: Effects of refractive error on detection acuity and resolution acuity in peripheral vision. In: Invest. Ophthalmol. Vis. Sci. (1997) 38: 2134-2143
58. White,J.M.; Bedell, H.E.: The oculomotor reference in human with bilateral macular disease. In: Invest. Ophthalmol. Vis. Sci. (1990) 31: 1149-1161
59. Wohlrab, T.M.; Kreinberger, H.; Erb, C.; Stübiger, N.; Dorner-Schandl, F.; Thiel, H.J.: Schwellenorientiert überschwellige Perimetrie und Schwellenwertperimetrie am Tübinger Automatikerimeter CC. In: Ophthalmologie (1998) 95: 92-99
60. Wong, A.M.F.; Sharpe, J.A.: A comparison of tangent screen, Goldmann, and Humphrey Perimetry in the detection and localization of occipital lesions. In: Ophthalmology (2000) 107: 527-544
61. [www.uak.medizin.uni-tuebingen.de/sba/SLO-Funktionsweise.html](http://www.uak.medizin.uni-tuebingen.de/sba/SLO-Funktionsweise.html), April 2003
62. [www.uni-heidelberg.de/presse/ruca/ruca1\\_2000/bille.html](http://www.uni-heidelberg.de/presse/ruca/ruca1_2000/bille.html), Juni 2003
63. [www.xalatan.com/health-pro/physician-resources/illustrations.html](http://www.xalatan.com/health-pro/physician-resources/illustrations.html), April 2003
64. Wirtschaftler, J.D.: In: Wellings P.C. Detection and recognition of visual field defects resulting from lesions involving the visual pathways. In: Aust. & NZ Journal of Ophthalmol. (1989)
65. Zur, D.; Ullman, S.: Filling-in retinal scotomas. In: Vision Research (2002) 43: 971-982

## 10. Anhang: Auflistung der Messergebnisse

**Tabelle 4: Auflistung der Testpersonen**

TP	Diagnose	Refraktion (dpt)	Visus, domin. Auge	Alter	Jahre-Sehbehinderung	Testabstand	Add In dpt	Pupillenweite
FM	Uveitis	Rechts: -2,0 -1,0 A 10° Links: -2,0 -1,0 A 50°	Rechts: 0,03 Links: 0,01	41	6	0,5 m	/	4 mm
JS	AMD	Rechts: +0,75 -0,50 A 155° Links: +1,25 -0,50 A 7°	Rechts: 0,16 Links: 0,01	78	5	1 m	1,0	3 mm
PP	Leber'sche Optikusatrophie	Rechts: / Links: /	Rechts: 0,03 Links: 0,02	31	11	1 m	/	5 mm
IP	Hereditäre Makuladystrophie ungeklärter Ursache	Rechts: / Links: /	Rechts: 0,03 Links: 0,01	65	20	1 m	1,0	2,5 mm
FJ	Leber'sche Optikusatrophie	Rechts: -0,75 Links: -0,75	Rechts: 0,1 Links: 0,07	32	11	1 m	/	4 mm
LM	Stargardt Dystrophie	Rechts: +1,50 -1,00 A 180° Links: +0,50	Rechts: 0,025 Links: 0,05	33	17	1 m	/	4 mm

B-MF	Netzhaut/ Aderhaut- dystrophie ungeklärter Ursache	Rechts: -2,50 -1,0 A 91° Links: -3,0 -1,50 A 11°	Rechts: 0,06 Links: 0,08	45	23	1 m	/	4 mm
LC	Tapetoretin ale Dystrophie	Rechts: -2,0 Links: -2,0	Rechts: 0,02 Links: 0,03	63	43	0,5 m	2,0	4 mm
UL	Netzhaut/ Aderhaut- dystrophie ungeklärter Ursache	Rechts: -16,0 Links: -15,0	Rechts: 0,0125 Links: 0,05	52	20	1 m	3,0	4 mm
MG	Tapetoretin ale Dystrophie	Rechts: -2,0 -3,0 A 90° Links: -2,0 -3,0 A 90°	Rechts: 0,01 Links: 0,07	59	32	1 m	/	3,5 mm
KI	Lebersche Optikus- atrophie	Rechts: Plan -1,0 A 100° Links: Plan -1,0 A 70°	Rechts: 0,03 Links: 0,03	56	33	1 m	1,0	3,5 mm
GT	AMD, Katarakt (R), Netzhaut- ablösung (L)	Rechts: +0,50 -1,50 A 165° Links: +0,50 -1,50 A 165°	Rechts: 0,03 Links: 0,05	79	3	1 m	1,0	3 mm
GG	AMD	Rechts: +0,50 Links: +1,25 -1,25 A 100°	Rechts: 0,02 Links: 0,05	77	5	1 m	/	3 mm
BB	AMD	Rechts: +1,75 -2,00 A 150° Links: +1,00 -1,00 A 45°	Rechts: 0,1 Links: 0,1	80	3	1 m	1,0	3 mm

MK	Netzhaut dystrophie	Rechts: / Links: /	Rechts: 0,08 Links: 0,06	42	20	0,5 m	/	5 mm
LH	Netzhaut dystrophie	Rechts: +2,0 -1,0 A 25° Links: +2,0	Rechts: 0,03 Links: 0,01	56	30	0,5 m	/	3,5 mm
IJ	AMD	Links: -3,0 -0,5 A 80°	Links: 0,06	79	8	1 m	/	3 mm

**Tabelle 5: Auflistung der Skotomdurchmesser**

<b>TEST PERSON</b>	<b>SKOTOM-DURCHMESSER</b>	<b>GOLDMANN ERGEBNISSE</b>	<b>PRL - SKOTOMGRENZE</b>
FM	R: 67° H, 50° V Stimulus: 6 mm (IV)	R: 57° H, 49° V Stimulus: V/4 e	Ca. 1°
JS	R: 8° H, 8° V L: 8° H, 12° V Stimulus: 8 mm (III) R: 9° H, 9° V Stimulus: 4 mm (II)	/	R: 2° L: 2°
PP	R: 17° H, 16° V L: 17° H, 24° V Stimulus: 4 mm (II) R: 14° H, 13° V Stimulus: 8 mm (III)	R: 13° H, 10° V L: 14° H, 16° V Stimulus: V/4 e	R: 2,5° L: 4°
IP	R: 26° H, 20° V L: 31° H, 30° V Stimulus: 8 mm (III)	/	R: 1° L: 1,5°
FJ	R: 7,5° H, 8° V L: 8° H, 10° V Stimulus: 2mm (I) R: 5° H, 5° V Stimulus: 4 mm (II)	R: 10° H, 11° V L: 7° H, 7° V Stimulus: I/4 e	/
LM	R: 21° H, 24° V L: 25° H, 20° V Stimulus: 8 mm (III)	R: 22° H, 26° V L: 25° H, 18° V Stimulus: II/4 e	R: 2° L: 2,5°
B-MF	R: 34° H, 23° V L: 28° H, 23° V Stimulus: 8 mm (III) L: 29° H, 24° Stimulus: 6 mm	R: 36° H, 26° V L: 31° H, 23° V Stimulus: V/4 e	R: ≥ 1° L: 1°
LC	R: 46° V L: 45° V Stimulus: 6 mm (IV)	R: 60° H, 52° V L: 63° H, 50° V Stimulus: V/4 e	R: 2,5° L: 1°

UL	L: 33° H, 23° V Stimulus: 8 mm (III) L: 35° H, 24° V Stimulus: 4 mm (II)	/	L: 1°
MG	R: 40° H 36° V L: 36° H 31° V Stimulus: 8mm (III)	R: 38° H, 39° V L: 37° H, 34° V Stimulus: V/4 e	R: 2° L: 1,5°
KI	R: 14° H, 14° V L: 10° H, 9° V Stimulus: 4 mm (II)	/	R: 3,5° L: 2,5°
GT	R: 19° H, 20° V L: 17° H, 15° V Stimulus: 8 mm (III) L: 17° H, 15° V Stimulus: 4 mm (II)	R: 40° H, 28° V L: 25° H, 20° V Stimulus: I/4 e	R: 2° L: 1°
GG	R: 40° H L: 25° H, 19° V Stimulus: 8 mm (III)	R: 39° H, 45° V L: 27° H, 20° V Stimulus: V/4 e	R: 1,5° L: 1°
BB	R: 12,5° H, 13° V L: 13° H, 12° V Stimulus: 4 mm (II)	/	R: 2°
MK	R: 48° H L: 60° H, 52° V Stimulus: 4 mm	R: 50° H, 86° V L: 58° H, 50° V Stimulus: II/4 e	R: 3° L: 5°
LH	R: 57° V Stimulus: 8 mm (V) R: 57° V Stimulus: 4 mm	R: 70° H, 60° V Stimulus: V/4 e	R: 2°
IJ	R: 19° H, 25° V Stimulus: 4 mm (II) R: 14° H, 11° V Stimulus: 8 mm	R: 20° H, 27° V	R: 10°

**Tabelle 6: Auflistung des exzentrischen Fixationswinkels**

<b>TEST PERSON</b>	<b>Exzentrische Fixation (EF) Auto-Plot</b>	<b>Exzentrische Fixation Power Refractor</b>
FM	R: Ca. 25° nach oben rechts	R: 20° Nach oben rechts
JS	R: 4° nach oben, 6° nach rechts, L: 5° nach oben, 6° nach links	R: 11° Nach rechts
PP	R: 12° nach oben, 2° nach rechts L: 13° nach oben, Ca. 11° nach links	R: 13° Nach oben
IP	R: 13° nach oben L: 16° nach oben, nach rechts	R: 11° Nach oben
FJ	/	/
LM	R: 11,5° nach oben, 5° nach rechts L: 2° nach oben, 13° nach rechts	R: 21° nach oben L: 22° nach oben, 13° nach links
B-MF	R: 8° nach oben, 7° nach rechts L: 7° nach oben, 6° nach rechts	L: 6° nach oben rechts
LC	R: Ca. 20° nach rechts, Ca 15° nach unten L: Ca. 18° nach unten, ca. 10° Nach rechts	R: 23° nach rechts, 15° nach unten L: 17° nach unten, 13° nach rechts
UL	L: Ca. 10° nach oben, Ca. 13° nach links	/
MG	R: Ca. 23° nach links L: Ca. 19° nach rechts	L: 19° nach rechts

KI	R: 10° nach oben, 1° nach links L: 9° nach oben, 1° nach links	L: 10° nach oben
GT	R: 9° nach oben L: 8° nach oben, 2° nach rechts	R: 11° nach oben L: 10° nach oben
GG	R: ca. 20° nach links L: Ca. 13° nach rechts	L: 14° nach rechts
BB	R: 8° nach links L: nach rechts?	/
MK	R: ca. 22° nach rechts L: ca. 23° nach links	R: 20° nach rechts L: 23° nach links
LH	R: ca. 28° nach rechts	
IJ	R: 18° nach links	R: 19°-22° nach links

**Tabelle 7: Vergleich der Ergebnisse des Rings mit kleinem Fixationskreuz**

<b>TESTPERSON</b>	<b>VERGLEICH: RING-KLEINES KREUZ</b>	<b>POSITION DES BLINDEN FLECKES, BESTIMMT MIT DEM RING</b>
FM	Rechts: gleiche Lage und Größe des Skotoms	Rechts: der blinde Fleck war im Skotom eingebettet
JS	Rechts: gleiche Lage des Skotoms, der Durchmesser war ca. 2° größer mit dem Ring Links: ca. gleiche Position and Durchmesser des Skotoms	Rechts: keine Verschiebung des blinden Fleckes Links: 1,5° nach oben und 1° nach rechts
PP	Rechts: gleiche Lage, der Durchmesser war 3° größer mit dem Ring	Rechts & Links: der blinde Fleck war pathologisch vergrößert (eine exakte Bestimmung ist deshalb schwierig)
IP	Rechts: gleiche Lage, der vertikale Durchmesser ist ca. 4° kleiner mit Ring	Rechts: Verschiebung 3° nach oben und 2° nach links Links: der blinde Fleck war im Skotom eingebettet
FJ	Rechts: gleiche Position, der Durchmesser war 1° größer mit Ring	Rechts & Links: der blinde Fleck war pathologisch vergrößert (leichte Verschiebung nach rechts)
LM	Rechts: gleiche Lage und Durchmesser des Skotoms Links: die Position des Skotoms war ca. 1° nach rechts verschoben bei Nutzung des Kreuzes, vergleichbare Größe des Skotoms	Rechts: keine Verschiebung des blinden Fleckes Links: 2,5° nach rechts
B-M F	Links: gleiche Position und Größe des Skotoms	Rechts: blinder Fleck war im Skotom eingebettet Links: 2,5° nach rechts
LC	Links: vergleichbare Lage des Skotoms; die Größe war größer mit dem Ring	Rechts & Links: der blinde Fleck war im Skotom eingebettet
UL	Links: 2° Verschiebung zwischen Kreuz und Ring, die Größe war ca. 2° kleiner mit dem Ring	Links: der blinde Fleck war im Skotom eingebettet
MG	Rechts: 2° Verschiebung zwischen Kreuz und Ring, die Größe war 2° größer mit Ring Links: 2° Verschiebung zwischen Kreuz und Ring, die Größe des Skotoms war gleich	Rechts & Links: der blinde Fleck war im Skotom eingebettet

KI	Nutzbare Messungen waren mit dem kleinen Kreuz nicht möglich, da viele Fixationsverluste auftraten	Rechts & Links: der blinde Fleck war pathologisch vergrößert (eine exakte Bestimmung war deshalb nicht möglich)
GT	Links: das Skotom ermittelt mit dem Kreuz war 2° nach oben und 1° nach rechts verschoben, die Größe war gleich	Rechts: 1° nach oben Links: 2,5° nach rechts
GG	Links: 5° Verschiebung zwischen Ring und kleinem Kreuz, der Durchmesser war 3° kleiner mit dem Ring	Links: der blinde Fleck war im Skotom eingebettet
BB	Nutzbare Messungen waren mit dem kleinen Kreuz nicht möglich, da viele Fixationsverluste auftraten	Rechts: 2° nach links Links: 2° nach rechts
MK	Rechts: gleiche Lage des Skotoms, der Durchmesser war 2° kleiner mit dem Ring	Rechts: der blinde Fleck war im Skotom eingebettet
LH	Rechts: 5° Verschiebung zwischen Kreuz und Ring, ungefähr der gleiche Skotomdurchmesser	Rechts: der blinde Fleck war im Skotom eingebettet
IJ	Rechts: 3° Verschiebung zwischen Kreuz und Ring, bei der Nutzung des kleinen Kreuzes war das Skotom nach oben verschoben, Gleicher Skotomdurchmesser	Links: keine Verschiebung des blinden Fleckes

**Tabelle 7: Subjektive Bewertung der Fixationsmarken durch die Testpersonen**

TESTPERSON	WELCHE FIXATIONSMARKE WURDE BEVORZUGT?
FM	Der Ring hat geholfen, es war schwieriger das sichtbare Kreuz über einen langen Zeitraum zu fixieren verglichen mit dem Ring, es war anstrengender und mehr fatigue
JS	Der Ring hat geholfen geradeaus zu sehen, Der Ring und das sichtbare Kreuz waren fast gleich, mit dem rechten Auge war es einfacher das Kreuz zu fixieren, mit dem linken Auge war es dagegen am einfachsten mit dem Ring
PP	Bevorzugte den Ring, hatte Schwierigkeiten eine stabile exzentrische Fixation zu erreichen
IP	Bevorzugte das große Kreuz, es war einfacher geradeaus zu sehen mit dem Ring verglichen mit dem kleinen Kreuz
FJ	Bevorzugte den Ring, das große Kreuz war ein wenig schwieriger
LM	Bevorzugte den Ring, hatte Schwierigkeiten eine stabile exzentrische Fixation zu erreichen
B-MF	Bevorzugte das große Kreuz, es war einfacher geradeaus zu sehen mit dem Ring verglichen mit dem kleinen Kreuz
LC	Bevorzugte das große Kreuz, es war einfacher geradeaus zu sehen mit dem Ring verglichen mit dem kleinen Kreuz
UL	Bevorzugte das große Kreuz, es war einfacher geradeaus zu sehen mit dem Ring verglichen mit dem kleinen Kreuz
MG	Bevorzugte das große Kreuz, es war einfacher geradeaus zu sehen mit dem Ring verglichen mit dem kleinen Kreuz

KI	Bevorzugte den Ring, hatte Schwierigkeiten eine stabile exzentrische Fixation zu erreichen, er hatte mehr Probleme mit dem rechten Auge, die Fixation war mit dem rechten Auge instabiler
GT	Der Ring wurde beim linken Auge bevorzugt, der Ring und das große Kreuz wurden für das rechte Auge als gleichwertig eingeschätzt
GG	Bevorzugte das große Kreuz, es war einfacher geradeaus zu sehen mit dem Ring verglichen mit dem kleinen Kreuz
BB	Bevorzugte das große Kreuz, es war einfacher geradeaus zu sehen mit dem Ring verglichen mit dem kleinen Kreuz
MK	Bevorzugte das große Kreuz, es war einfacher geradeaus zu sehen mit dem Ring verglichen mit dem kleinen Kreuz
LH	Bevorzugte das große Kreuz, es war einfacher geradeaus zu sehen mit dem Ring verglichen mit dem kleinen Kreuz
IJ	Der Ring half gerade aus zu sehen, Ring und großes Kreuz wurden als gleichwertig eingestuft

## **Danksagung**

Ich möchte mich bei allen herzlich bedanken, die mich bei der Vorbereitung, Durchführung, Auswertung und Niederschrift dieser Diplomarbeit unterstützt haben.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Jörgen Gustafsson, Leiter des „Low Vision Enabling“ Labors in Lund/ Schweden, für die Überlassung des Themas und die wertvollen Hinweise bei der Anfertigung der Arbeit. Bei den Untersuchungen konnte ich immer mit seiner Unterstützung rechnen. Die konstruktiven Diskussionen hatten einen entscheidenden Anteil daran, dass die Arbeit in der vorliegenden Form zum Abschluss gebracht werden konnte.

Weiterhin möchte ich mich bei Frau Professor Bodil Jönsson für die Arbeitsmöglichkeiten an Geräten und in den Räumen des Certec-Instituts bedanken, und auch dem Kreis der Mitarbeiter, die mich dort herzlich aufgenommen haben, gilt mein Dank.

Ich möchte mich ebenfalls bei Frau Prof. Krimpmann-Rehberg bedanken, die mir wichtige Tipps und Anregungen gegeben und mit Rat und Tat zur Seite gestanden hat.

Mein Dank gilt auch dem Zentralverband der Augenoptiker, der mit seiner finanziellen Unterstützung mir erst die Möglichkeit gegeben hat, diese Diplomarbeit in Schweden zu schreiben.