

## **Das Blue Arc Phänomenon:**

*Untersuchung zur Inzidenz bei Farbtüchtigen und  
Farbenblinden*

von Gerald Scheibelhofer

Januar 2007

**Diplomarbeit zur Erlangung des Magistertitels in Psychologie an  
der Karl-Franzens Universität Graz, Institut für Psychologie**

**Begutachter: Prof. Dr. Christian Kaernbach**

### **Danksagung**

Ich möchte allen jenen danken, die direkt oder indirekt bei der Entstehung dieser Arbeit geholfen haben, insbesondere Christian für die interessante Betreuung, Frau Prof. Langmann und Frau Dr. Koch vom LKH Graz für die Unterstützung bei der Probandensuche, sowie den Teilnehmern und Teilnehmerinnen am Diplomandenseminar für die fruchtbare Zusammenarbeit.

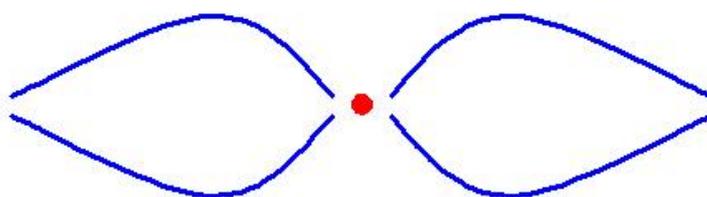
## **1. Abstract:**

Im Rahmen dieser Arbeit wurden zwei Studien zum Blue Arc Phänomen durchgeführt, erstens eine Inzidenzstudie mit farbtüchtigen und farbschwachen bzw. farbenblinden Personen und zweitens ein computergestützter Formabgleich. Das Blue Arc Phänomen ist ein entoptischer retinaler Effekt, der auftritt, wenn man einen kleinen Lichtstimulus in ansonsten dunkler Umgebung betrachtet – man kann dann blaue Bögen links und rechts des Lichtes erkennen – und wurde erstmals von J.E. Purkinje im Jahre 1825 beschrieben. Von den 77 Farbtüchtigen der Inzidenzstudie konnten insgesamt 88% diesen Effekt wahrnehmen, bei der Gruppe der Deuteranomalien waren es 80% und bei den Achromaten 17%. Diese Ergebnisse stützen die Theorie, dass primär Zapfen erregt werden müssen und dass vermutlich kurzwellige Zapfen für die Entstehung der Blue Arcs verantwortlich sind. Im Experiment zum Formabgleich konnte gezeigt werden, dass interindividuelle Unterschiede größer waren als intraindividuelle, somit ist es möglich, einfache computergestützte Experimentalaufbauten für dieses Phänomen herzustellen.

## **2. Einleitung:**

Das so genannte Blue Arc Phänomenon ist ein entoptischer (durch sekundäre Erregung erzeugter) retinaler Effekt, der auftritt, wenn man in Dunkelheit einen einzelnen Lichtreiz betrachtet – z.B. eine rote Leuchtdiode in ansonsten dunkler Umgebung. Bewegt man die Augen leicht neben dem Lichtpunkt (oder fixiert einen Punkt bei nur kurz auftretendem Lichtreiz), so kann man links und rechts von diesem Reiz blaue Bögen erkennen (siehe Abbildung 1).

*Abbildung 1: Das Blue Arc Phänomenon*



Diese Bögen, die je nach Fixationspunkt in Höhe und Breite unterschiedlich sind, treten monokular auf, d.h. bei Betrachtung mit nur dem rechten Auge können auch nur die Bögen rechts neben dem Punkt gesehen werden und vice versa. Es gibt eine Farbkonstanz der Bögen, diese werden nämlich unabhängig von der Farbe des Lichtreizes als bläulich beschrieben.

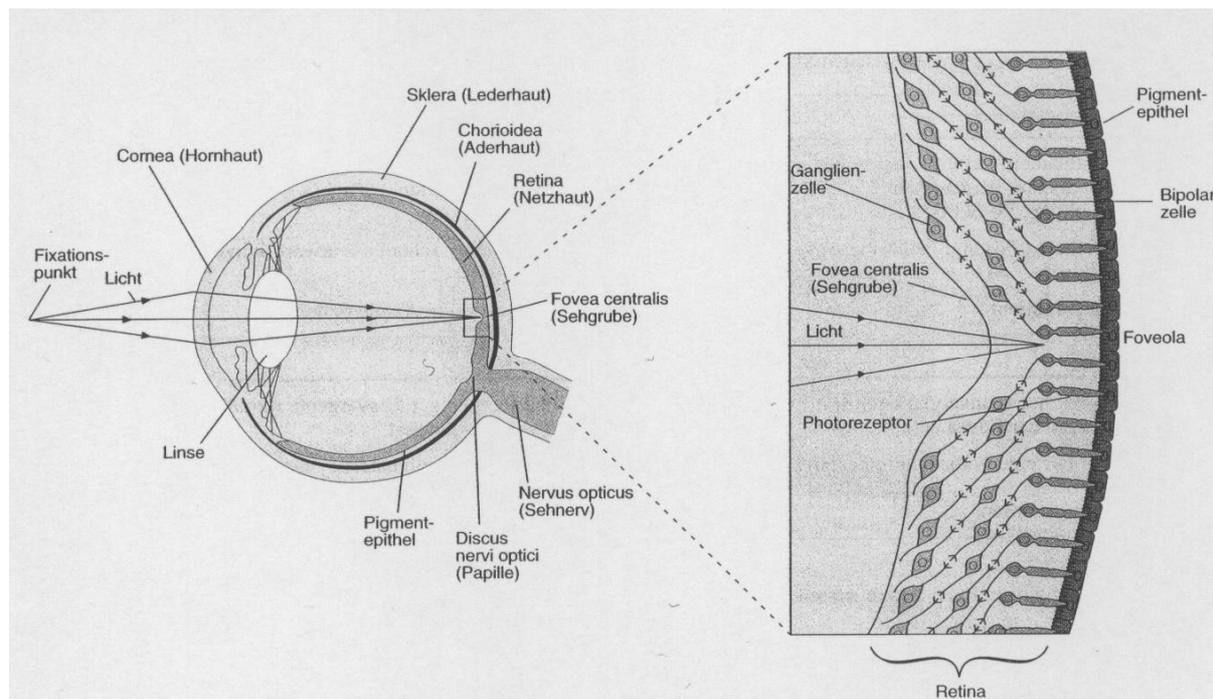
Zum ersten Mal wurde dieses Phänomen von J.E. Purkinje (1825) beschrieben, die zugrunde liegenden Mechanismen sind bis heute noch nicht vollständig geklärt.

Im ersten Teil dieser Einleitung wird allgemein die visuelle Informationsverarbeitung des Menschen behandelt, insbesondere das Farbsehen, der zweite Teil befasst sich mit der Literatur zum Blue Arc Phänomen selbst.

### **2.1 Visuelle Informationsverarbeitung**

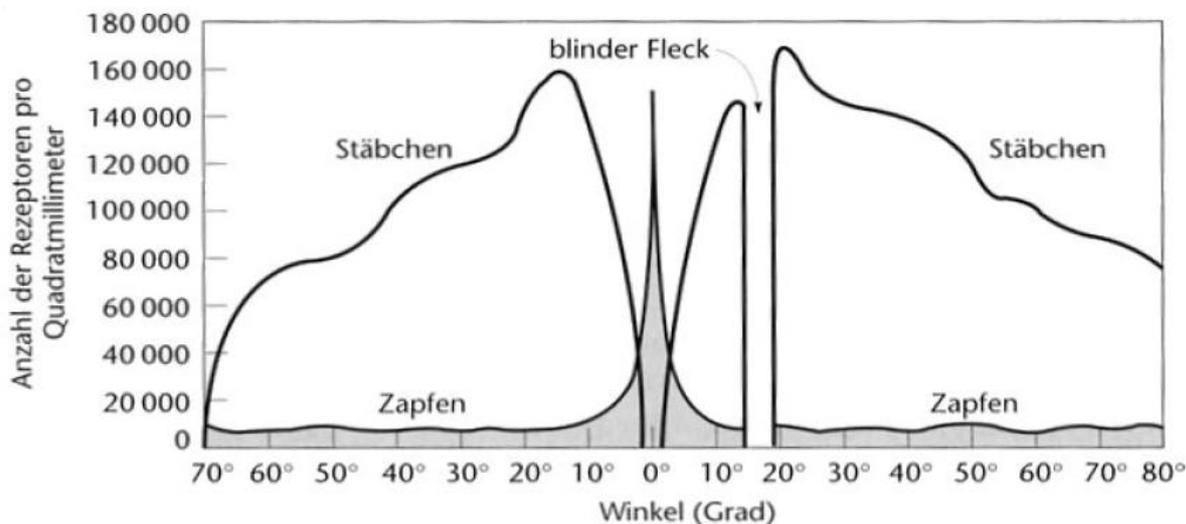
Sehen beginnt selbstverständlich mit dem Auge – eintreffende Lichtstrahlen werden an der Hornhaut und der Linse gebrochen und treffen dann gebündelt auf die Retina (siehe Abb. 2), welche sowohl die eigentlichen Photorezeptoren beinhaltet als auch Elemente zur ersten Verarbeitung der Information.

Abbildung 2: Das menschliche Auge (Kandel, Schwartz &amp; Jessell, 1996)



Als Photorezeptoren fungieren die Stäbchen und Zapfen, welche vom eintreffenden Licht aus gesehen, auf der hinteren Seite der Retina liegen, davor liegen Zellen, die der Informationsverarbeitung dienen. Am Ort des schärfsten Sehens, der Fovea oder Sehgrube, sind diese Zellen seitlich versetzt, wie in Abbildung 2 zu sehen ist, damit wird das Licht dort nicht zusätzlich gebrochen. Außerdem ist die Konzentration an Zapfen, welche für das Tagsehen verantwortlich sind, in der Fovea am höchsten, dafür gibt es hier keine Stäbchen, die eine höhere Lichtempfindlichkeit haben und für das Nachtsehen zuständig sind (siehe Abb. 3).

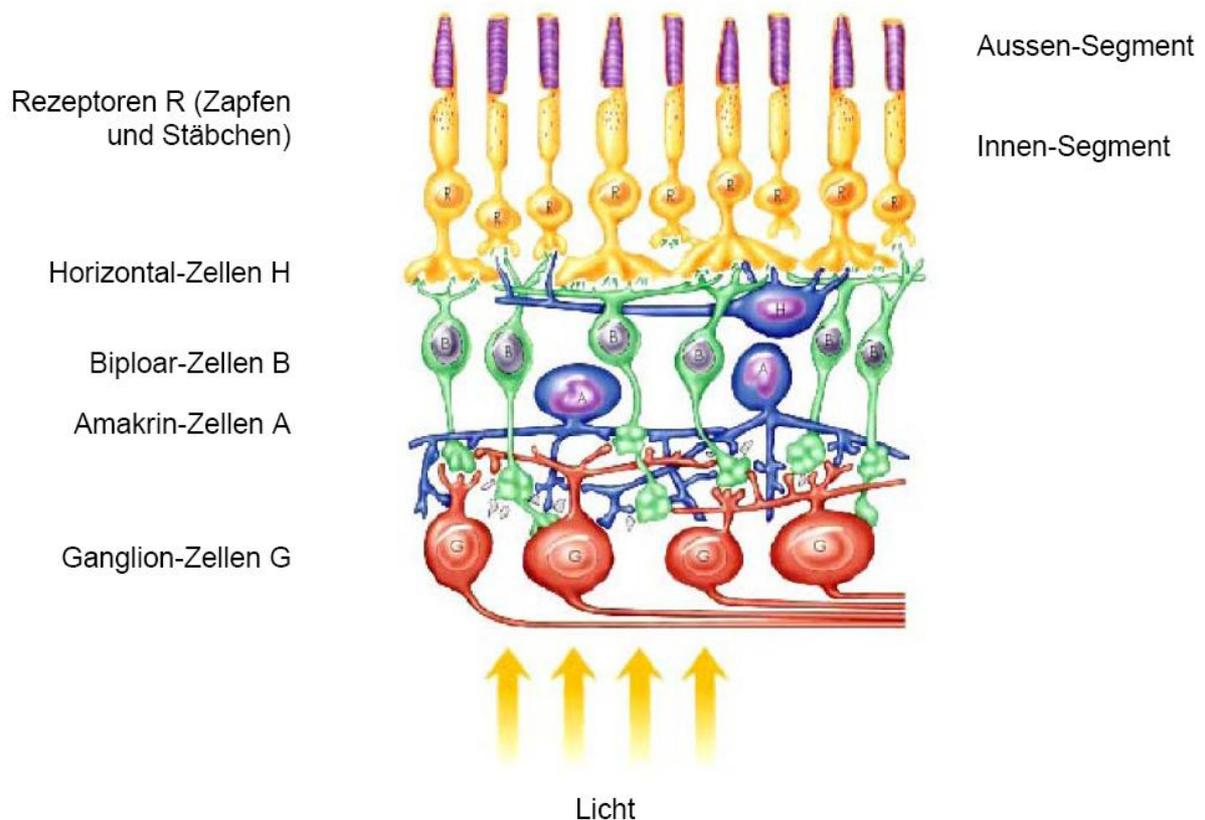
Abbildung 3: Rezeptorverteilung auf der Retina (Goldstein, 2002)



Dies führt zu dem Effekt, dass man in dunklen Nächten, um Dinge besser erkennen zu können, den Blick nicht direkt darauf, sondern etwas daneben richten muss, da die Zapfen in der Fovea nicht empfindlich genug sind, um auf geringe Lichtmengen zu reagieren. Die Fovea hat einen Durchmesser von ca.  $2^\circ$  Sehwinkel und liegt im Mittelpunkt der Macula (gelber Fleck), diese umfasst einen Bereich von etwa  $6^\circ$  Sehwinkel und ist wichtig für eine scharfe visuelle Wahrnehmung.

Insgesamt gibt es wesentlich mehr Stäbchen als Zapfen auf der Retina (siehe Abb. 3). An der Stelle, wo die Axone der weiterverarbeitenden Ganglienzellen das Auge verlassen und den Sehnerv bilden, gibt es keinerlei Photorezeptoren – hier befindet sich der blinde Fleck. Die Signale der Photorezeptoren werden bereits in der Retina weiter verarbeitet über Horizontalzellen, Bipolarzellen, Amakrinzellen und Ganglienzellen (siehe Abb.4). Jede Ganglienzelle bekommt dadurch Informationen von vielen Photorezeptoren, die zu so genannten rezeptiven Feldern verschaltet werden. Von den Ganglienzellen ziehen dann die Axone, die den Sehnerv bilden, aus dem Auge und ins Gehirn.

Abbildung 4: Retinale Zellverschaltungen (Goldstein, 2002)

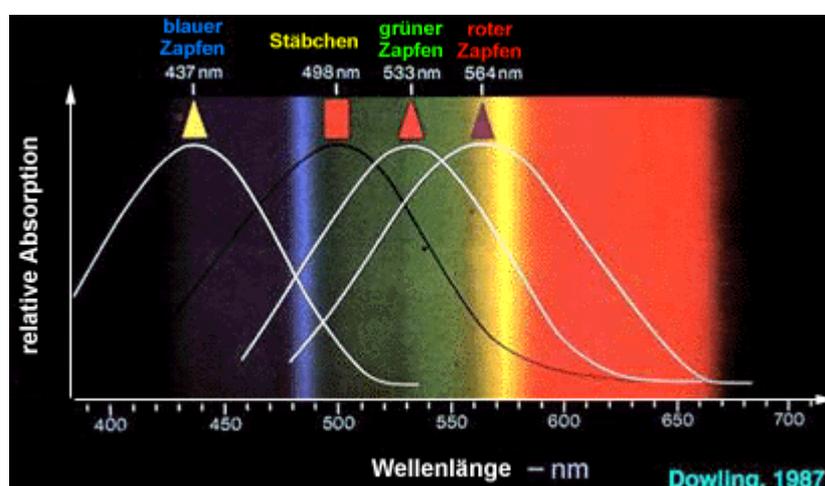


Die rezeptiven Felder, welche durch die Zellverschaltungen erzeugt werden, haben typischerweise die Form eines Kreises oder Spots (durch Bipolarzellen erzeugt), um den ein Annulus liegt (mittels Horizontalzellen verschaltet). Zentrum (Spot) und Umfeld (Annulus)

können entweder aktivierend oder hemmend verschaltet sein, man spricht von rezeptiven Feldern mit On- oder Off-Zentrum, wobei das Umfeld entgegengesetzt verschaltet ist, d.h. bei On-Zentrum ein Off-Umfeld und umgekehrt. Diese On-Off Verschaltung reagiert sehr gut auf Kontraste, und mit der weiteren Verschaltung im visuellen System (laterale Inhibition) werden die Kontraste noch mehr verstärkt. Somit ist unser System der visuellen Wahrnehmung ein sehr gut kontrastierendes, was z.B. äußerst hilfreich bei der Entdeckung von Kanten ist. Natürlich ist diese Art der Verarbeitung auch für bestimmte Fehleinschätzungen verantwortlich, wie man mit verschiedensten optischen Täuschungen zeigen kann – beispielsweise sieht ein grauer Punkt auf schwarzem Hintergrund heller aus als auf weißem Hintergrund (ein Ergebnis der verstärkten Kontraste).

Für die Wahrnehmung von Farben sind die Zapfen zuständig, man unterscheidet 3 verschiedene Zapfentypen – je nach Empfindlichkeit für bestimmte Wellenlängen des Lichts – nämlich S-Zapfen (short wave length), M-Zapfen (middle wave length) und L-Zapfen (long wave length). Es werden auch die Bezeichnungen Blau-, Grün- und Rotzapfen statt kurz-, mittel- und langwellig verwendet, jedoch reagieren die Zapfen ja nicht nur auf eine Farbe, sondern auf ein ganzes Spektrum. In Abbildung 5 sind die Kurven der spektralen Empfindlichkeit für die drei Zapfentypen und die Stäbchen eingezeichnet.

Abbildung 5: Spektrale Empfindlichkeit der Zapfen (Dowling, 1987)



Was unsere Augen und unser Gehirn als Farben interpretieren, ist nicht anderes als Licht verschiedener Wellenlängen in einem Bereich, in dem unsere Photorezeptoren reagieren (etwa 400nm bis 750nm). Farben sind für unser Sehen wichtig, weil sich mit ihnen Objekte mit gleicher Oberflächenbeschaffenheit und gleicher Helligkeit unterscheiden lassen – eine gelbe und eine blaue Billardkugel sind für den Normalsichtigen leicht auseinander zu halten.

Außerdem stechen rote Früchte zwischen grünen Blättern besser hervor - man geht davon aus, dass sich mittel- und langwellige Zapfen evolutionär erst später auseinander entwickelt und damit die Rot-Grün-Unterscheidung erheblich verbessert haben. Darum überlappen sich die Kurven der M- und L-Zapfen auch erheblich (siehe Abb. 5). Eine Farbe ist bestimmt durch ihren Farbton (Wellenlänge), ihre Helligkeit (Intensität des Lichts) und die Sättigung (Weißanteil).

Von den drei Zapfentypen gibt es in der Retina unterschiedlich viele; am häufigsten sind die L-Zapfen (oder Rotzapfen) mit ungefähr 60%, mit circa 30% folgen die M-Zapfen (oder Grünzapfen) und nur etwa 10% sind S-Zapfen (oder Blauzapfen).

Ist einer der Zapfentypen nicht funktionstüchtig, so können immer noch Farben unterschieden werden, jedoch kann man bestimmte Farbkontraste kaum noch erkennen. Sind L- oder M-Zapfen betroffen, so spricht man von Rot-Grün-Schwäche (bzw. –Blindheit bei starker Ausprägung), Personen mit dieser Farbschwäche tun sich vor allem mit der Unterscheidung von Rot, Grün, Gelb und Braun schwer. Man unterscheidet hierbei die Protanomalie oder Rotschwäche (bei defekten L-Zapfen) und die Deuteranomalie oder Grünschwäche (bei defekten M-Zapfen). Ist der S-Zapfentyp defekt, so nennt man dies Tritanomalie oder Blau-Gelb-Schwäche (bzw. –Blindheit bei starker Ausprägung). Der Defekt besteht bei diesen Farbschwächen normalerweise in einer verringerten Bildung des jeweiligen Photopigments (Opsins) des Zapfens, bzw. einem völligen Fehlen dieses Pigments, die Ursache ist üblicherweise ein Gendefekt. Da Protanomalie und Deuteranomalie X-Chromosomal vererbt werden, sind Männer wesentlich häufiger von Rot-Grün-Schwäche betroffen, geschätzte 1% der Männer sind von Rotschwäche und 5% von Grünschwäche betroffen, bei den Frauen sind nur etwa 0,02 bis 0,4% betroffen. Tritanomalie ist wesentlich seltener (etwa 0,002%), hier gibt es keinen Zusammenhang mit dem Geschlecht.

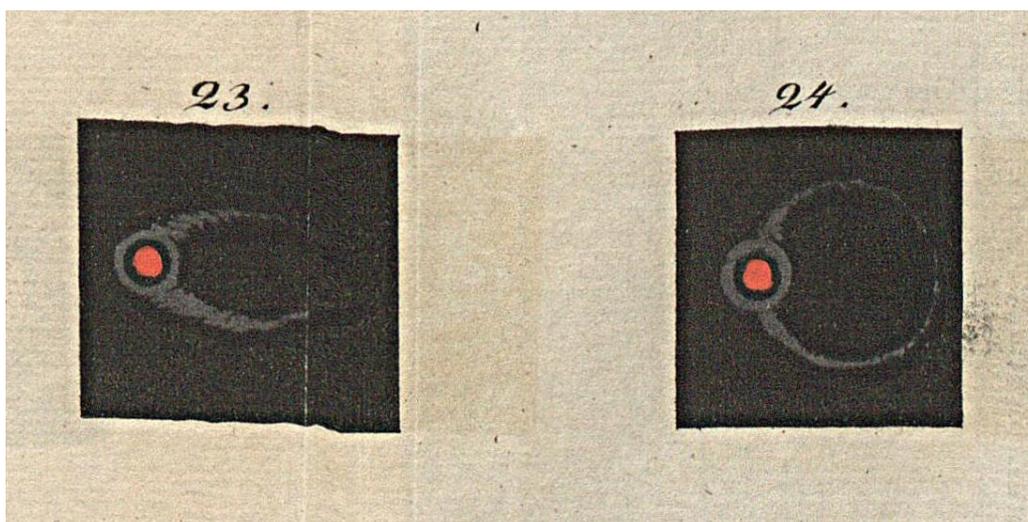
Sollten zwei oder sogar alle drei Zapfentypen nicht mehr funktionstüchtig sein, so kann man gar keine Farben mehr unterscheiden – dieses Phänomen nennt man totale Farbenblindheit oder Achromatopsie. Hierbei ist meist auch die Sehschärfe beeinträchtigt und eine erhöhte Lichtempfindlichkeit gegeben, da die Stäbchen, die dann vermehrt zum Einsatz kommen, für das Nachtsehen ausgelegt sind. Achromatopsie ist, wie auch die Tritanomalie, eine sehr seltene (etwa 0,003%) und geschlechtsunabhängige Erkrankung.

## 2.2 Literatur zum Blue Arc Phänomenon

1825 wurde das Blue Arc Phänomen erstmals von J.E. Purkinje beschrieben und als „die elliptischen Lichtstreifen“ bezeichnet. Purkinje entdeckte das Phänomen, als er mit Hilfe eines Zündschwammes Feuer machen wollte und die Glut im Dunkel betrachtete. Nach einigen Versuchen zeigte sich, dass die „matt lichtbläulichen“ Bögen sichtbar werden, wenn man nicht direkt auf die Glut sieht, sondern etwas seitlich davon (rechts mit dem rechten Auge und umgekehrt). Er beobachtete auch, dass sich Form und Größe der Ellipsen verändern, wenn man den Blickpunkt relativ zum Lichtpunkt verändert, so dass man die Bögen sowohl sehr flach elliptisch als auch beinahe kreisförmig sehen kann (siehe Abb. 6).

Weitere wichtige Beobachtungen, die Purkinje machte, sind die Tatsache, dass die Bögen vom „Achsenpunkt der Retina bis zur Eintrittsstelle des Sehnerven“ gehen, dass es schwieriger wird, die Bögen zu sehen, wenn man länger in der Dunkelheit verbleibt und dass zu starkes oder zu schwaches Licht es unmöglich machen, die Lichtstreifen zu sehen.

*Abbildung 6: Purkinjes elliptische Lichtstreifen (Purkinje, 1825)*

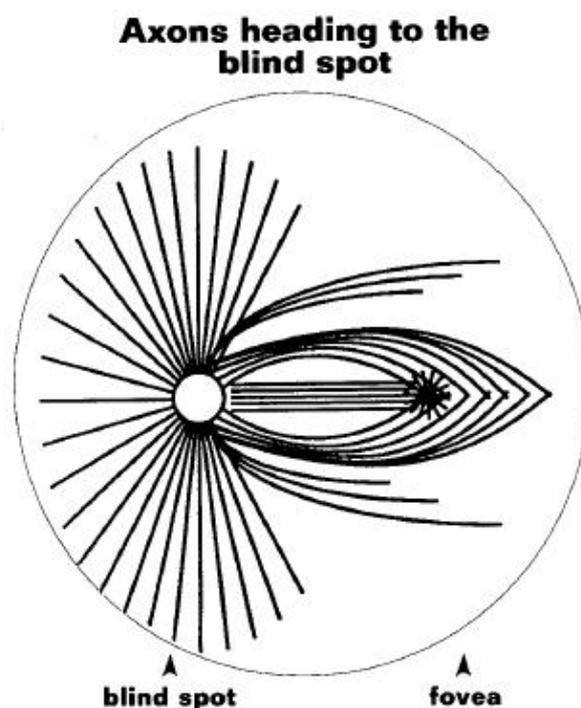


Wie man auf den Zeichnungen Purkinjes (Abb. 6) erkennen kann, nahm er auch einen kreisrunden Lichthof um den Stimulus herum wahr, der in der Literatur späterer Autoren nicht mehr auftaucht – auch ich selbst konnte einen solchen Lichthof noch nicht wahrnehmen.

80 Jahre später verfasste Hans Gertz (1905) einen Artikel, in dem er das Blue Arc Phänomen als neuartiges visuelles Phänomen beschrieb, das man erkennen kann, wenn man einen vertikalen Lichtbalken (idealerweise in Rot) betrachtet, wobei der Fixationspunkt  $0,33^\circ$  bis  $6^\circ$  temporalwärts vom Lichtreiz liegen muss. Gertz schrieb, dass die Bögen eindeutig mit

den Sehnervenbahnen korrespondieren, die in der Retina genau solche elliptischen Wege zum blinden Fleck beschreiben (siehe Abb. 7). Nach seiner Hypothese entstehen die Bögen dadurch, dass der Lichtstimulus Photorezeptoren auf der Retina erregt, diese Erregung auf den elliptischen Sehnervenbahnen Richtung blinder Fleck geleitet wird und es hierbei zu einer Art elektrischem Übersprechen auf die unter den Nervenbahnen gelegenen Rezeptoren kommt. Somit seien die Bögen, die wir sehen, unsere Wahrnehmung des Aktionsstroms der Sehnervenfasern.

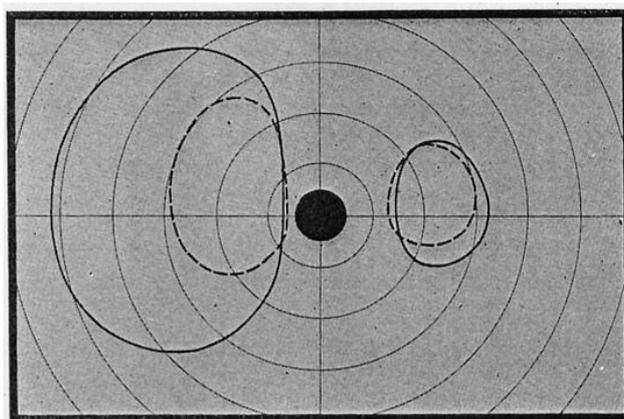
Abbildung 7: Schematische Darstellung der Sehnervenbahnen im Auge (Wolfe, 1991)



Außerdem beobachtete Gertz (1905) noch, dass egal, welche Farbe der Lichtstimulus hat, die Bögen ihre bläuliche Farbe behalten, jedoch sind die Bögen bei langwelligem Licht leichter wahrzunehmen als bei kurzwelligem Licht.

Der Irrtum, das Blue Arc Phänomenon sei noch unbekannt, unterlief laut Amberson (1924) nicht nur Hans Gertz, sondern auch einer Reihe weiterer Autoren – selbst heutzutage ist es noch schwierig, an gute Literatur über diesen Effekt zu kommen, da die meisten Artikel darüber bereits sehr alt sind und das Phänomen alles andere als weithin bekannt ist. Laut Amberson (1924) stammt die Bezeichnung „Blue Arcs“, die auch heute noch verwendet wird, von Christine Ladd-Franklin vom Marine Biological Laboratory, Woods Hole.

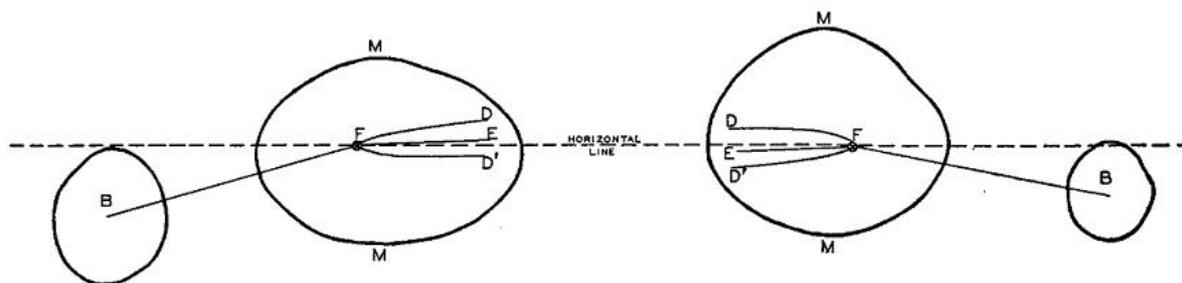
Abbildung 8: Areale, in denen ein Stimulus Blue Arcs erzeugt (Amberson, 1924)



William Amberson (1924) hat den Bereich vermessen, in dem der Stimulus relativ zum Fixationspunkt liegen darf, um das Phänomen noch zu sehen (siehe Abb. 8) – er zeigte, dass es einen größeren ovalen Bereich (links vom rechten Auge oder umgekehrt) gibt, in dem ein Stimulus die Blue Arcs hervorruft und einen kleineren ovalen Bereich auf der gegenüberliegenden Seite, der ein so genanntes „Blue Spike“ hervorruft – ein Effekt, den bereits Gertz (1905) beschrieb und als „lanzettförmigen bläulichen Lichtstreifen“ beschrieb (man stelle sich die blauen Bögen sehr nahe aneinander vor und den Bereich zwischen den Bögen als ausgefüllt). Ein größerer Lichtreiz kann dabei in einem größeren Bereich das Blue Arc Phänomen erzeugen (siehe Abb. 8, Bereich mit durchgezogenen Linien) als ein kleinerer Lichtreiz (siehe Abb.8, Bereich mit gestrichelten Linien). Liegt der Stimulus im Bereich der Fovea, so sind laut Amberson (1924) keine blauen Bögen zu sehen – da in der Fovea keine Stäbchen vorhanden sind, schloss er daraus, dass es hier einen Zusammenhang geben könnte.

Dolecek & DeLaunay (1945) führten ebenfalls ein Experiment durch, um den Bereich zu bestimmen, in dem der Stimulus sich befinden darf, um die Blue Arcs zu erzeugen und kamen zu einem anderen Ergebnis – sie fanden nämlich keinen „blinden Bereich“ um die Fovea. In Abbildung 9 kann man die Ergebnisse von Dolecek & DeLaunay (1945) sehen, die einen großen zusammenhängenden Bereich bilden, der laut den Autoren mit den Dimensionen der Macula übereinstimmt (etwa  $6^\circ$  Sehwinkel Durchmesser). Möglicherweise sind die unterschiedlichen Stimuli der Autoren der Grund für die Abweichungen, da Dolecek & DeLaunay (1945) einen Lichtpunkt mit nur  $15'$  Durchmesser verwendeten, während bei Amberson (1924) bereits der kleine Lichtschlitz über  $1^\circ$  hoch war.

Abbildung 9: Areale, in denen ein Stimulus Blue Arcs erzeugt (Dolecek & DeLaunay, 1945)



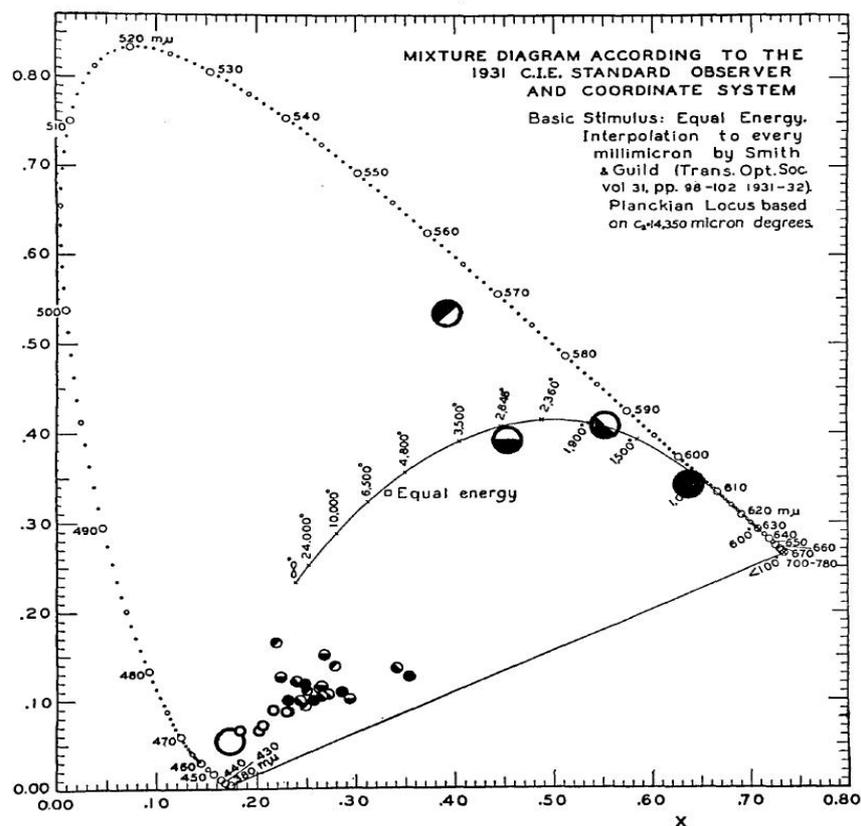
Im Artikel von Amberson (1924) wurde auch gezeigt, dass die papillo-foveale Linie (also die Verbindung Fovea – Blinder Fleck) die Symmetrieachse der blauen Bögen bildet, was auch mit den Bahnen der Nervenfasern im Auge korrespondiert.

Eine seiner Versuchspersonen, die ein Skotom (defekter Bereich der Retina) zwischen Fovea und blindem Fleck hatte, konnte die Bögen auch sehen, diese wurden jedoch vom Skotom unterbrochen. Laut Pasquale (2002) ist das Blue Arc Phänomen ein geeigneter Test, um Gesichtsfeldausfälle bei Glaukompatienten zu entdecken – möglicherweise ist es auch für andere Zwecke nutzbar, die mit der Nervenleitung im Auge zu tun haben. William Amberson (1924) postulierte auch, dass Personen, bei denen Teile der Nervenfasern zwischen Fovea und blindem Fleck myelinisiert sind, die Bögen an diesen Stellen auch nicht wahrnehmen können – er konnte dies sogar zeigen, jedoch nur anhand einer Versuchsperson.

Vermutlich werden nach Amberson (1924) nicht die Photorezeptoren selbst durch den Aktionsstrom der Nervenfasern erregt, da die Rezeptoren relativ weit weg von den Fasern liegen, sondern eher näher liegende Zellen, wie etwa die Ganglienzellen.

Nicht nur die Form und Position der Blue Arcs wurden untersucht, sondern auch die Farbkonstanz dieses Phänomens. Newhall (1937) zeigte in seiner Untersuchung, dass bei großen Veränderungen der Stimulusfarbe (von Rot bis Blau) es nur kleine Änderungen in der wahrgenommenen Farbe der Bögen gibt. Die Ergebnisse von Newhall (1937) sind in Abbildung 10 ersichtlich, hier ist die CIE – Farbkurve aufgetragen, die großen Kreise stellen die Stimulusfarben dar und die kleinen Kreise die jeweils resultierenden Farben der Bögen. Wie man sieht, variiert die Farbe der Bögen im linken unteren Bereich der CIE – Kurve, also im Bereich Blau / Purpur.

Abbildung 10: Farbe der Bögen in Abhängigkeit von der Stimulusfarbe (Newhall, 1937)



Die Farbe der Arcs wurde bei Newhall (1937) fast immer als bläulich beschrieben, jedoch besteht ein signifikanter Zusammenhang, dass Stimuli mit kleineren Wellenlängen bläuerer Bögen erzeugen und Stimuli mit größeren Wellenlängen rötlichere Bögen (also eher ins Purpur gehende). Ein weiteres Experiment zur Bogenfarbe von Newhall (1937) wurde mit nur einer Versuchsperson durchgeführt; dabei wurde die Lichtstärke des Stimulus von der Schwelle (wo gerade noch Bögen wahrnehmbar sind) bis zu einem Wert, wo die Bögen gerade noch nicht vom Stimulus überstrahlt werden, variiert. Hierbei zeigte sich, dass nahe der Schwelle die Bögen achromatisch, also grau, wahrgenommen wurden und auch in den Durchgängen mit der höchsten Stimulusintensität wurden achromatische Bögen berichtet. Bei den mittleren Intensitäten schwankte die Farbeinschätzung von grau-bläulich über blau und violett bis hin zu purpur. Aufgrund dieser Ergebnisse vermutete Newhall (1937), dass sowohl die empfindlichen Stäbchen als auch die kurzwelligen Zapfen für die Bögen verantwortlich seien, wobei bei größeren Wellenlängen Streulicht des Stimulus für eine rötlichere Farbe sorgen könnte, da das Streulicht die langwelligen Zapfen stimuliert.

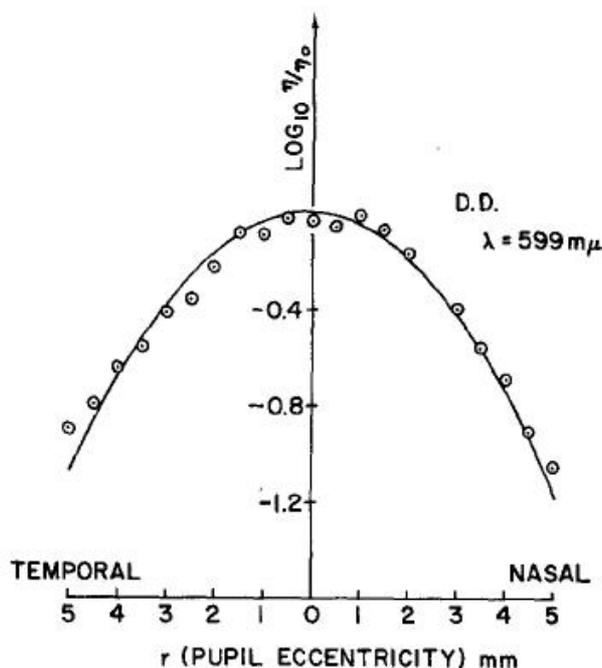
Weiters konnte Newhall (1937) zeigen, dass Lichtadaptation vor dem Experiment das Phänomen besser sichtbar macht und Dunkeladaptation die Wahrnehmung der Bögen schwächt. Laut Newhall (1937) kann eine Reizung der Netzhaut mit Licht die elektrische

Erregbarkeit der Retina erhöhen, während Dunkeladaptation selbige abschwächt, daher spricht dieser Befund für die Theorie, dass die Bögen durch elektrische Vorgänge zustande kommen. Die Blue Arcs sind nach Newhall (1937) bei Fixation des Auges für maximal 0,9 Sekunden sichtbar, diese kurze Zeitdauer spricht nach seiner Interpretation durchaus auch für die elektrische Theorie.

Eine andere Hypothese über die Entstehung der Bögen, die bis zu dieser Zeit noch nicht widerlegt war, war jene, dass die Reizung der Netzhaut mit dem Stimulus eine Art Biolumineszenz im Auge erzeugte, die Rezeptoren bzw. die Nervenleitungen sozusagen kurz aufleuchteten und durch dieses Aufleuchten die sekundäre Stimulation erfolgte (siehe Ladd-Franklin, 1926). Jedoch gab es nie gute empirische Belege dafür und Alpern & Dudley (1966) konnten diese Theorie schließlich experimentell widerlegen. Hierfür ließen sie die Probanden beleuchtete „Pseudo – Blue-Arcs“ so in der Helligkeit einstellen, dass diese mit der Helligkeit von echten Blue Arcs übereinstimmte. Stimulus und Fixationspunkt wurden so gewählt, dass sowohl die „Pseudo – Blue-Arcs“ als auch die durch den Stimulus erzeugten Blue Arcs über- bzw. untereinander sichtbar waren. Nun wurde die Region zwischen Fovea und blindem Fleck mit weißem Licht beleuchtet und dann die Zeit gestoppt, bis die Blue Arcs und die „Pseudo – Blue-Arcs“ wieder wahrgenommen wurden. Als erstes wurden dabei die echten blauen Bögen wieder sichtbar, erst etwa eineinhalb Minuten später waren die falschen Bögen wahrzunehmen. Wäre ein Aufleuchten der Rezeptoren die Ursache für die Bögen, müssten die „Pseudo – Blue-Arcs“ spätestens dann sichtbar werden, wenn auch die echten Bögen gesehen werden. Da die Helligkeit der falschen Bögen aber noch nicht ausreicht, um diese früher zu erkennen, kann es sich nicht um ein lichtinduziertes Phänomen handeln.

Alpern & Dudley (1966) konnten außerdem zeigen, dass der primäre Stimulus Zapfen erregt und nicht Stäbchen, wie viele Autoren vermutet haben. Dies wurde klar, nachdem sie eine Abhängigkeit des Stimulus vom Eintrittswinkel ins Auge nachwiesen, wie es nur bei Zapfen vorkommt (siehe Abb. 11) – je weiter der Stimulus vom Pupillenmittelpunkt weggedreht wird, umso intensiver muss der Lichtreiz sein, um das Blue Arc Phänomen zu erzeugen. Weiter untermauert wurde dieser Befund durch die Abhängigkeit der Blue Arc – Wahrnehmung von der Dunkeladaptation, die ebenfalls eindeutig für Zapfen als primär erregte Elemente spricht. Natürlich könnte es sein, dass Stäbchen die sekundär erregten Elemente sind, die die blauen Bögen selbst erzeugen – bzw. weiter verschaltete Zellen wie z.B. die Ganglienzellen, die Stäbchensignale weiterleiten.

Abbildung 11: Abhängigkeit der Pupillenexzentrizität und der Schwellenintensität eines Stimulus, um Blue Arcs zu erzeugen (Alpern & Dudley, 1966)



Alpern & Dudley (1966) schließen es nicht aus, dass es Konstellationen geben könnte, in denen auch Stäbchen primär erregt und die Blue Arcs sichtbar werden, sie können es nur für ihre Experimentalbedingungen ausschließen.

Wenn wir davon ausgehen, dass primär Zapfen erregt werden müssen, damit die blauen Bögen wahrgenommen werden können, dann dürften so genannte Stäbchenmonochromaten, also Personen, bei denen als Photorezeptoren nur mehr die Stäbchen funktionieren und die daher an vollständiger Farbenblindheit leiden, das Blue Arc Phänomen nicht sehen können. Dies wäre eine Möglichkeit, die Schlussfolgerungen von Alpern & Dudley (1966) zu stützen. Generell scheinen Personen mit Farbfehlsichtigkeiten eine hoch interessante Versuchsgruppe für Experimente zum Blue Arc Phänomen zu sein, da es ja je nach Schädigung der einzelnen Photorezeptoren unterschiedliche Farbstörungen gibt. Somit könnte man je nachdem, welche farbfehlsichtigen Personen die blauen Bögen sehen können, bestimmte Rezeptortypen für die Entstehung des Phänomens ausschließen. Genau darauf zielt auch meine hier vorliegende Studie ab, da sich in der mir vorliegenden Literatur noch kein Blue-Arc-Forscher mit farbfehlsichtigen Personen befasst hat.

Eine weitere wichtige Frage, die sich mir stellte war, ob jeder Normalsichtige die blauen Bögen sehen kann, denn ich konnte keine einzige Angabe zur Inzidenzrate des Blue Arc Phänomen finden. Offenbar wird davon ausgegangen, dass jeder, der nicht gerade an einer Störung des Sehapparates - besonders der Retina - leidet, dieses Phänomen wahrnehmen

kann. Darum liegt das Hauptaugenmerk meiner Studie darauf, eine Inzidenzrate zu erheben für Normalsichtige (im Sinne von farbtüchtig) und Personen mit Störungen der Farbwahrnehmung, da dies wie bereits erwähnt, hoffentlich neue Erkenntnisse über das Blue Arc Phänomen zu Tage bringt.

Da die meiste Literatur zu diesem Thema bereits älteren Datums ist, stellte sich auch die Frage, ob man auch einen einfachen Versuchsaufbau für die Blue Arc – Wahrnehmung computerunterstützt erstellen könnte. Die Idee war, den Stimulus per Monitor darzubieten und gleichzeitig auch einen Formabgleich der blauen Bögen am Monitor durchzuführen. Führen mehrere Versuchspersonen diesen Formabgleich in mehreren Durchgängen – bei gleich bleibendem Fixationspunkt – durch, so sollte die Varianz zwischen den einzelnen Personen höher sein als bei den Durchgängen einer einzelnen Person. Dies ist zu erwarten, da ja jeder Mensch eine etwas andere Augenanatomie hat und bei gleich bleibendem Fixationspunkt immer in etwa dieselben Nervenfasern im Auge erregt werden sollten – vorausgesetzt natürlich, der computergestützte Versuchsaufbau funktioniert wie er sollte. Wenn dieser computergestützte Versuch funktioniert, hieße das, dass man für manche Experimente zum Blue Arc Phänomen ohne größeren Aufwand einen Versuchsaufbau herstellen kann und dieser auch einfach modifizierbar wäre.

### **3. Methode**

Zwei unterschiedliche Studien wurden durchgeführt – erstens eine Inzidenzuntersuchung bei farbtüchtigen und farbschwachen Personen und zweitens ein computergestützter Versuch zum Formabgleich der blauen Bögen.

#### **3.1 Inzidenzuntersuchung**

##### **3.1.1 Versuchspersonen**

An der Studie zur Inzidenz nahmen 50 farbtüchtige Personen, 6 Personen mit Deuteranomalie und 6 Personen mit Achromatopsie (davon 2 vollständige und 4 teilweise Achromaten) teil. Im Rahmen einer Voruntersuchung wurden weitere 27 farbtüchtige und 4 deuteranomale Personen getestet, somit enthält die Gesamtstichprobe 77 Farbtüchtige, 10 Deuteranomale und 6 Achromaten – also insgesamt 93 Probanden.

Die Farbtüchtigen unterteilen sich in 45 Männer und 32 Frauen, die Deuteranomalen in 8 Männer und 2 Frauen und die Achromaten in 2 Männer und 4 Frauen. Das Durchschnittsalter beträgt über alle Probanden 27,3 Jahre (Range von 16 bis 63 Jahre). Von den 77 farbtüchtigen Probanden gaben 25 an, eine Sehschwäche zu haben – fast ausschließlich wurden Kurz- oder Weitsichtigkeit und die Dioptrienzahl angegeben.

Fast alle Probanden wurden aus einem erweiterten Bekanntenkreis rekrutiert, die Achromaten konnten mit Hilfe der Augenklinik des LKH Graz rekrutiert werden.

### **3.1.2 Stimulusmaterial**

Für die Präsentation des Stimulus wurde eine mobile Untersuchungsbox hergestellt (siehe Anhang) – dazu wurde ein Werkzeugkoffer aus Hartplastik (32,5 x 24 x 53 cm) an der schmalen Seite mit einem 10 x 3 cm großen Sehschlitz versehen und in 25 cm Entfernung von diesem eine Diodenplatte eingebaut, auf der mehrere rote und blaue Leuchtdioden angebracht wurden. Als Stimulus wurde dabei immer nur die zentrale rote Leuchtdiode verwendet. Um eine gute Abdunkelung zu gewährleisten, wurde ein größeres Stück schwarzer Stoff am Deckel über dem Sehschlitz befestigt – dieser Stoff wurde während dem Versuch über den Kopf der Probanden geworfen, um den Lichteinfall zu minimieren.

### **3.1.3 Versuchsaufbau und Durchführung**

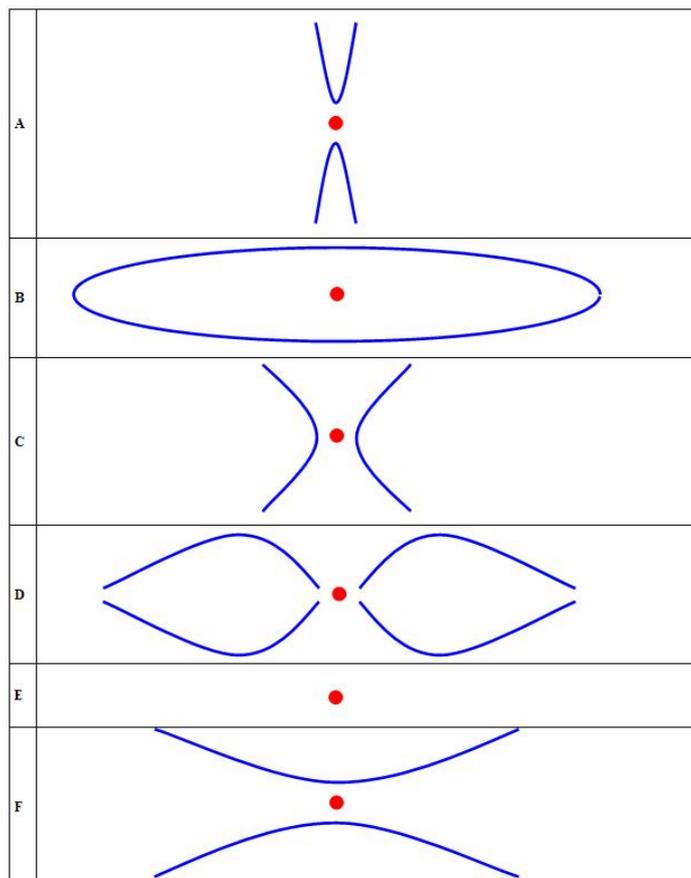
Durch die mobile Untersuchungsbox konnte der Versuch an verschiedensten Orten durchgeführt werden, Voraussetzung war nur eine gute Ausleuchtung mit Tageslicht (für die Lichtadaptation). Um bei der Inzidenzuntersuchung Antworten im Sinne sozialer Erwünschtheit zu minimieren, gliederte sich dieser Versuch in maximal 5 Stufen mit stetigem Informationszuwachs für die Probanden.

- *1.Stufe:* Proband wird befragt, was er sieht, wenn er in einem ansonsten völlig dunklen Raum einen roten Lichtpunkt, wie z.B. von einer Leuchtdiode erzeugt, betrachtet.
- *2.Stufe:* Die Versuchsperson wirft einen Blick ohne weitere Information in die mobile Untersuchungsbox und wird dann befragt, was sie gesehen hat.

- *3. Stufe:* Es wird dem Probanden erklärt, er solle links und rechts vom Lichtpunkt auf eine andere Form in einer anderen Farbe achten. Nach einem weiteren Blick in die Box wird wieder gefragt, was er gesehen hat.
- *4. Stufe:* Der Versuchsperson werden 6 Alternativen (siehe Abb. 12) angeboten und gesagt, sie möge auf solche Streifen achten. Erneut wird nach einem Blick in die Box gefragt, was gesehen wurde und ob es mit einer der Alternativen übereinstimmt.
- *5. Stufe:* Dem Probanden wird das Blue Arc Phenomenon auf dem Alternativen – Blatt gezeigt und er wird gebeten, danach Ausschau zu halten. Es werden noch weitere Hinweise gegeben, um die Bögen zu sehen, wie z.B. die Augen in kurzer Entfernung neben dem Lichtpunkt bewegen, blinzeln, ein Auge schließen.

Erhoben wurde, ab welcher Stufe (bzw. ob überhaupt) die blauen Bögen wahrgenommen wurden, die Probanden konnten jederzeit eine verbale Beschreibung geben oder auch mit Hilfe von bereit liegenden Buntstiften eine Zeichnung anfertigen.

Abbildung 12: Alternativen für Stufe 4 der Inzidenzuntersuchung



Konnte die Versuchsperson bereits vor Stufe 5 das Blue Arc Phenomenon adäquat beschreiben – sei es verbal und/oder zeichnerisch –, so wurden die weiteren Stufen nicht mehr

durchgeführt, da davon ausgegangen wird, dass die Blue Arcs auch in den höheren Stufen sichtbar bleiben.

Vor jeder Stufe wurden die Probanden lichtadaptiert, um die Bedingungen möglichst optimal zu halten – die Lichtadaptation erfolgte einfach per Tageslicht, da alle Versuche tagsüber stattfanden.

Nach dem Versuch wurden die Daten der Versuchsperson aufgenommen (Alter, Geschlecht, Sehschwäche) und ihr der Hintergrund dieses Versuchs erläutert. Bei Personen mit Verdacht auf Rot-Grün-Schwäche wurde noch ein Farbttest mit Ishihara-Farbtafeln durchgeführt, um abzuklären ob ein Farbschwäche vorhanden ist und wenn ja, welche. Die Ishihara-Tafeln hatten den Vorteil, leicht transportabel zu sein, aber den Nachteil, nicht genau sagen zu können, ob die Personen nur farbschwach waren oder echte Dichromaten. Üblicherweise dauerte der Versuch 10-15 Minuten.

## **3.2 Formabgleich der Bögen**

### **3.2.1 Versuchspersonen**

10 Personen wurden getestet, wobei eine Person von der Auswertung ausgeschlossen werden musste (sie sah die Blue Arcs vom Fixationspunkt ausgehend anstatt vom Stimulusbalken), somit verbleiben 9 Probanden für diesen Versuch. Von diesen 9 Personen sind 3 männlichen und 6 weiblichen Geschlechts, das Durchschnittsalter beträgt 25,4 Jahre. Die Rekrutierung erfolgte innerhalb des Diplomandenseminars, da hier bereits bekannt war, dass alle Personen die blauen Bögen sehen konnten.

### **3.2.2 Stimulusmaterial**

Wie sich herausstellte, sind TFT-Monitore ungeeignet, um einen solchen Versuch durchzuführen, da selbst bei Darstellung eines schwarzen Bildschirms die Hintergrundbeleuchtung noch so hell ist, dass etwaige Blue Arcs überstrahlt werden. Daher wurde der Stimulus auf einem kontraststarken CRT-Monitor (Nokia 447W) präsentiert, der mit sehr niedriger Helligkeitseinstellung ein Schwarz erzeugt, das dunkel genug ist, um noch Bögen zu sehen. Als Stimulus selbst wurde per Software ein  $0,65^\circ$  Schinkel breiter und

3,23° Sehwinkel hoher gelber Balken erzeugt, der in einem 1s – Takt blinkte. Dieser Stimulus wurde gewählt, weil sich damit auf diesem Monitor die schönsten Blue Arcs zeigten.

### 3.2.3 Versuchsaufbau

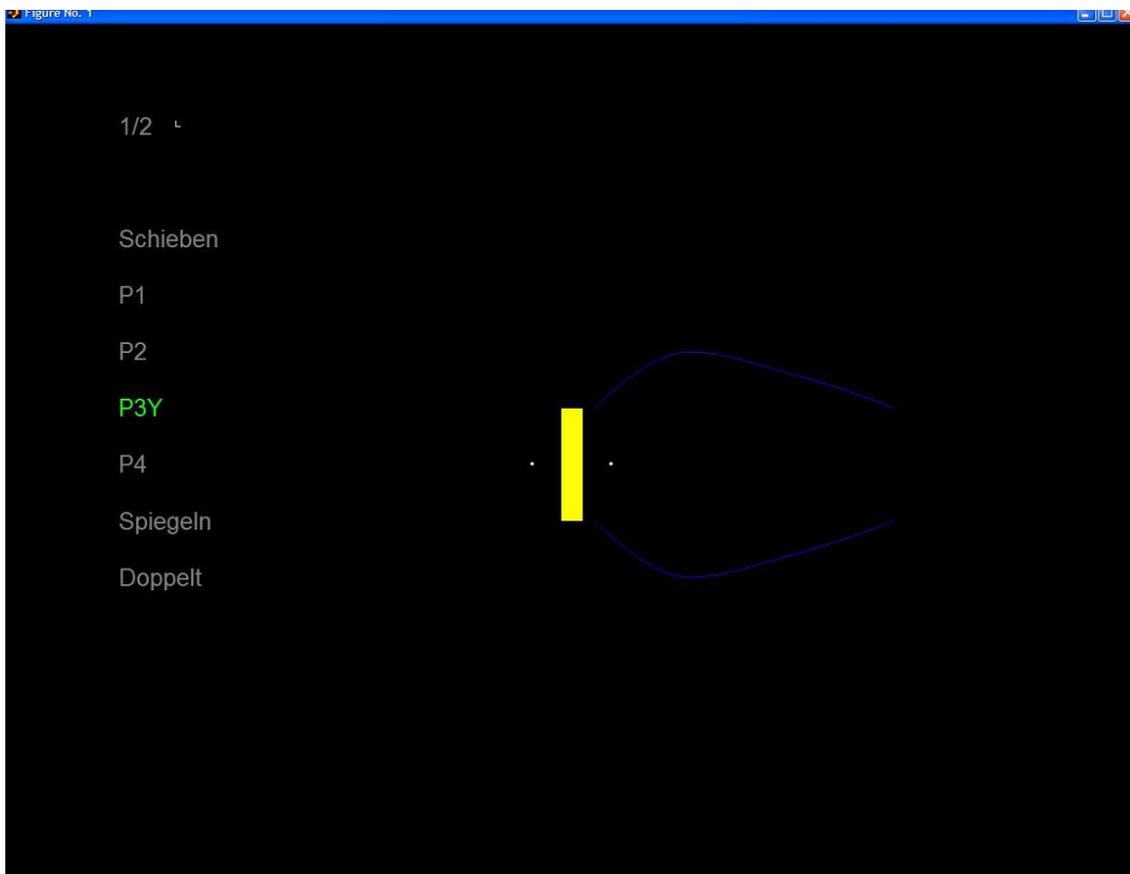
Vor dem CRT-Monitor wurde zur Abdunkelung eine 53 cm lange Box aus Karton angebracht, die mit einem 8 x 2 cm Sehschlitz versehen wurde und auf der dem Bildschirm zugewandten Seite offen war. Über die komplette Länge der Box wurde noch ein lichtundurchlässiger Stoff gelegt, den man sich als Versuchsperson zur besseren Abdunkelung über den Kopf warf. Durch den Sehschlitz konnte fast der ganze Bereich des Bildschirms gesehen werden – Länge und Breite der Box entsprachen den Abmessungen des Bildschirms, die Größe der Box wurde so angepasst, dass sie möglichst lichtdicht war.

Mit Hilfe von MATLAB wurde ein Programm geschrieben, das sowohl den gelben Stimulusbalken mittig am Bildschirm sowie Fixationspunkte 1,13° links und rechts vom Stimulusmittelpunkt – 0,81° vom Rand des Stimulus – darstellte, als auch einen Formabgleich der Bögen mittels eines aus 4 Punkten berechneten Splines möglich machte. Ursprünglich sollte der Stimulus ein roter Lichtpunkt sein, jedoch konnte ein solcher vom Computer erzeugter Punkt auf keinem Monitor blaue Bögen erzeugen. Daher wurde für die Voruntersuchung mit Hilfe eines computergesteuerten Laserpointers ein Lichtpunkt von Außen auf den Monitor projiziert, was einen viel höheren Kontrast möglich machte – auf TFT-Bildschirmen war es damit jedoch auch nicht möglich, Blue Arcs zu erzeugen, und zwar wegen der zu hellen Hintergrundbeleuchtung des Monitors. Erst nach langer Optimierung der Stimulusgröße und –farbe auf einem kontrastreichen, dunkel eingestellten CRT-Monitor konnte der Stimulus auch vom Programm erzeugt werden, was einfacher und weniger problematisch beim Abgleich war (kein Lichthof mehr um den Stimulus).

Im „Abgleich-Modus“ (siehe Abb. 13) war am Bildschirm ein Menü sichtbar, mit dem man die in Blau dargestellte Kurve manipulieren konnte. Es bestand die Möglichkeit, jeden der 4 Punkte des Splines individuell in X- oder Y-Richtung zu verschieben (mit Ausnahme von Punkt 3, dieser konnte nur in Y-Richtung verschoben werden, der X-Wert lag immer mittig zwischen Punkt 2 und 4) oder die gesamte Kurve zu verschieben, spiegeln oder zu verdoppeln (standardmäßig wurde nur der Bogen rechts oben dargestellt, abgeglichen wurde üblicherweise mit symmetrischem Bogenpaar). Wie grob oder fein die Veränderungen sein sollten, war ebenfalls einstellbar. Mittels einer Taste konnte die Versuchsperson in den „Seh-Modus“ umschalten, in der nur mehr der Stimulusbalken sichtbar war und im 1s – Takt

blinkte, sowie die beiden Fixationspunkte links und rechts des Stimulus. Im „Abgleich-Modus“ wurde nämlich bereits zu viel Licht vom Monitor ausgesendet, um die Bögen noch gut sehen zu können, außerdem begünstigt der blinkende Stimulus das Sehen der Blue Arcs.

Abbildung 13: Screenshot des Formabgleichprogramms im Abgleich-Modus



### 3.2.4 Versuchsdurchführung

Die Probanden saßen auf einem Stuhl, so dass sie aufrecht sitzend durch den Sehschlitz auf den Bildschirm sehen konnten. Vor jedem Durchgang wurde zur Abdunkelung der Stoff über den Kopf geworfen, die Tastatur lag im Schoß der Probanden. Anfangs gab es 4 Probedurchgänge, um die Handhabung der Tastatur bzw. des Menüs für den Abgleich zu erlernen, dazu wurde ein weißer Bogen am Bildschirm dargestellt, der genau mit dem verstellbaren blauen Bogen überdeckt werden sollte.

Nach den 4 Probedurchgängen gab es 10 Durchgänge, in denen dann die wirklich gesehenen Bögen nachgezeichnet wurden. Hierzu wurden die Versuchspersonen instruiert, immer nur mit dem rechten Auge auf den rechten Fixationspunkt zu sehen (alle Personen konnten die Bögen rechts besser sehen) und den Kopf dabei möglichst ruhig und gerade zu halten (es

wurde keine Kopfstütze verwendet). Sobald die Blue Arcs gut sichtbar waren, sollte umgeschaltet werden, das eben gesehene Bild mit den nachgezeichneten Bögen verglichen werden und diese nach zu justieren. Dies wurde so lange gemacht, bis eine zufriedenstellende, möglichst genaue Nachbildung der blauen Bögen entstand, per Tastendruck startete dann der nächste Durchgang (die Punkte wurden natürlich gespeichert). Vor jedem Durchgang – und immer wenn die Versuchspersonen die Bögen nur noch schlecht sehen konnten – wurden die Probanden mit Tageslicht lichtadaptiert, um die Bedingungen möglichst optimal zu halten. Es wurden also pro Durchgang 4 Punkte ermittelt, welche die nachgezeichneten blauen Bögen bestimmen, über alle Durchgänge damit 40 Datenpunkte pro Person.

Anschließend wurde noch die Position des blinden Flecks mit einem separaten Programm, das auch in MATLAB geschrieben wurde, ermittelt. Dabei wurde ein Fixationspunkt mit dem rechten Auge angesehen und ein beweglicher Punkt so lange nach rechts verschoben, bis er verschwand. Dies wurde mit 5 Punkten in 5 unterschiedlichen Höhen (Y-Werten) relativ zum Fixationspunkt gemacht ( $3,2^\circ$   $1,6^\circ$   $0^\circ$   $-1,6^\circ$   $-3,2^\circ$ ). Mit weiteren 5 Punkten in denselben Höhen wurde dann noch erhoben, wann der Punkt wieder erscheint, nachdem er verschwand – damit konnten die Umrisse des blinden Flecks grob erhoben werden. Insgesamt dauerte der ganze Versuch etwa 45 – 90 Minuten.

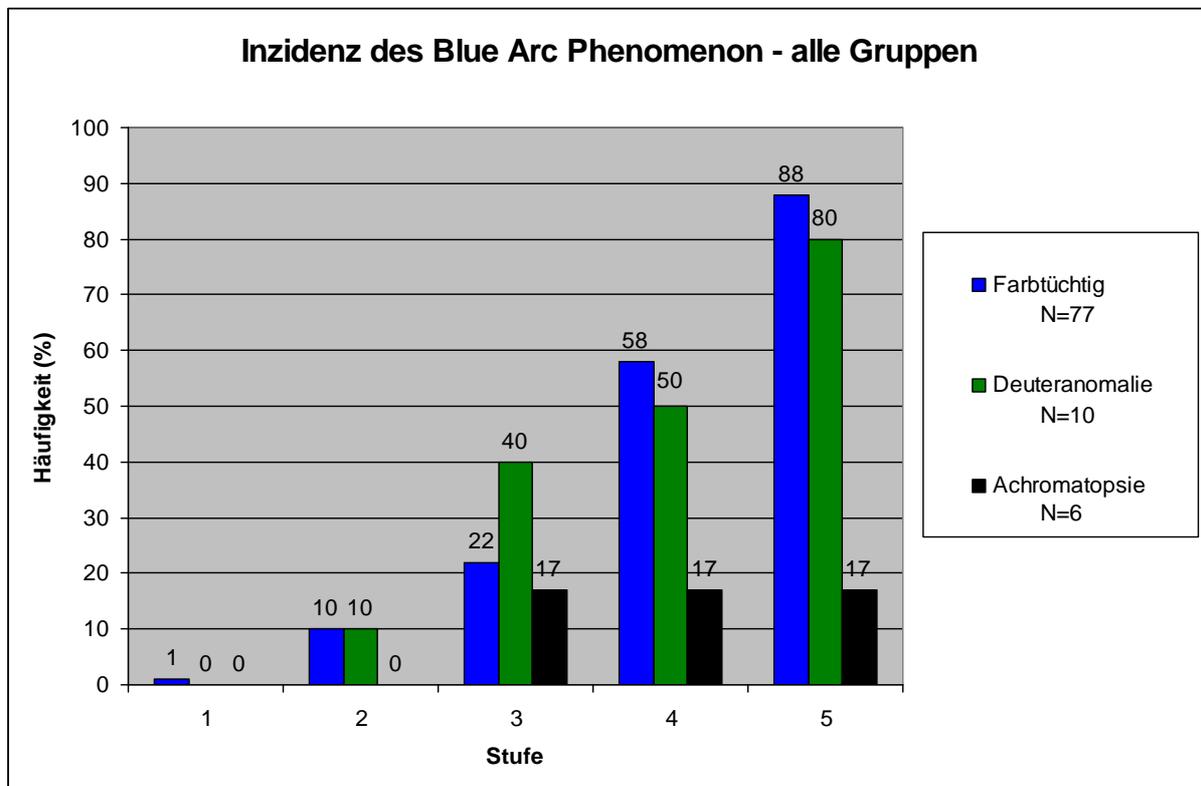
## **4. Ergebnisse**

### **4.1 Ergebnisse der Inzidenzstudie**

Die Ergebnisse der Inzidenzuntersuchung für alle 3 Gruppen (Farbtüchtig, Deuteranomalie, Achromatopsie) in den 5 Stufen sind in Abbildung 14 visualisiert. Wie man sieht, konnte nur ein einziger Proband ohne weitere Vorinformation berichten, die Blue Arcs schon einmal gesehen zu haben. In Stufe 2 konnten bereits 10 % der Farbtüchtigen und der Deuteranomalien die blauen Bögen beschreiben. Nach dem Hinweis, auf etwas in einer anderen Farbe neben dem Lichtpunkt zu achten, konnten bereits 22% der Farbtüchtigen und 40% der Deuteranomalien die Blue Arcs sehen, sowie ein Proband aus der Gruppe der Achromaten, der dieses Phänomen jedoch in grau sah und nicht in blau (diese Person war nur teilweise farbenblind, konnte starke Farbkontraste also noch erkennen). Bei der Vorgabe der Alternativen (siehe Abb. 12) stieg die Zahl der Farbtüchtigen, welche die Bögen sahen, auf 58% und bei den Deuteranomalien erhöhte sie sich auf 50%. Mit voller Information, wie man

das Blue Arc Phänomen am besten sehen kann, konnten schließlich 88% der Farbtüchtigen und 80% der Deuteranomalien die Bögen erkennen, bei den Achromaten konnte auch insgesamt nur eine Person berichten, das Phänomen zu sehen.

Abbildung 14: Ergebnisse der Inzidenzstudie



Jedoch gibt es auch einige wenige Personen, die berichten, eine von den anderen Alternativen zu sehen, nämlich Alternative B (siehe Abb. 12), die eine Ellipse mit dem Lichtreiz im Mittelpunkt darstellt. Ein Proband aus der Gruppe der Achromaten berichtete, die Form dieser Ellipse zu sehen, sowie drei Personen aus der Gruppe der Farbtüchtigen. Von diesen Personen konnte nur eine aus der Gruppe der Farbtüchtigen das Blue Arc Phänomen sehen, berichtete jedoch auch von einer elliptischen Form.

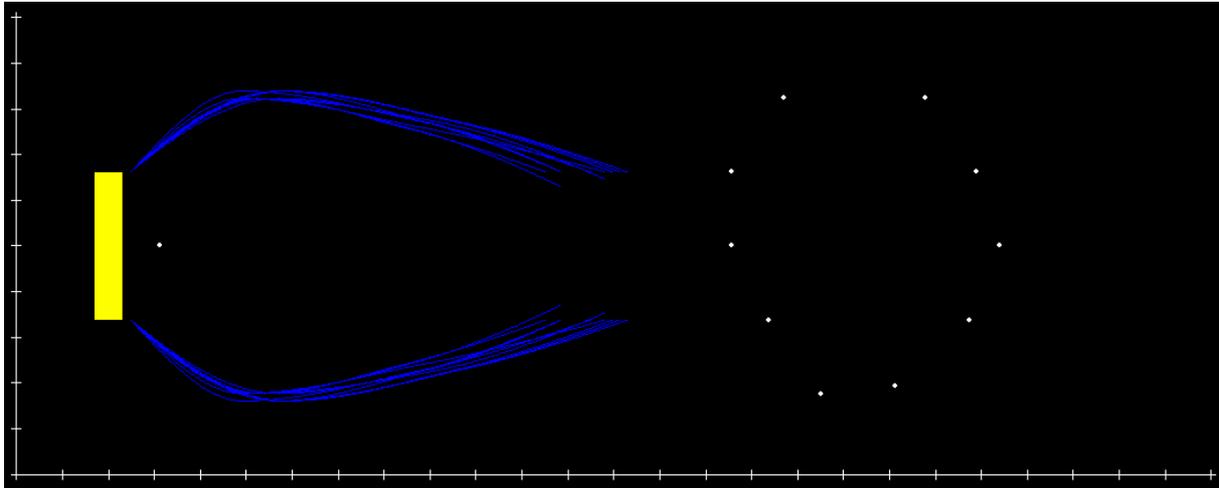
In der Gruppe der Farbtüchtigen konnten insgesamt 9 Personen die blauen Bögen nicht sehen, davon war nur eine weiblichen Geschlechts – bei einer Geschlechtsaufteilung von 45 Männern und 32 Frauen. Auch in der Gruppe der Deuteranomalien konnten 2 Personen keine Blue Arcs wahrnehmen, beide waren männlichen Geschlechts. Für die Achromaten macht eine solche Aufteilung keinen Sinn, da man hier davon ausgeht, dass die bekannten Defekte in der Retina das Sehen der blauen Bögen nur schwer bis gar nicht möglich machen.

Es ist kein Zusammenhang zwischen Wahrnehmung der Blue Arcs und anderen Sehschwächen wie Kurz- oder Weitsichtigkeit ersichtlich.

## 4.2 Ergebnisse der Studie zum Formabgleich

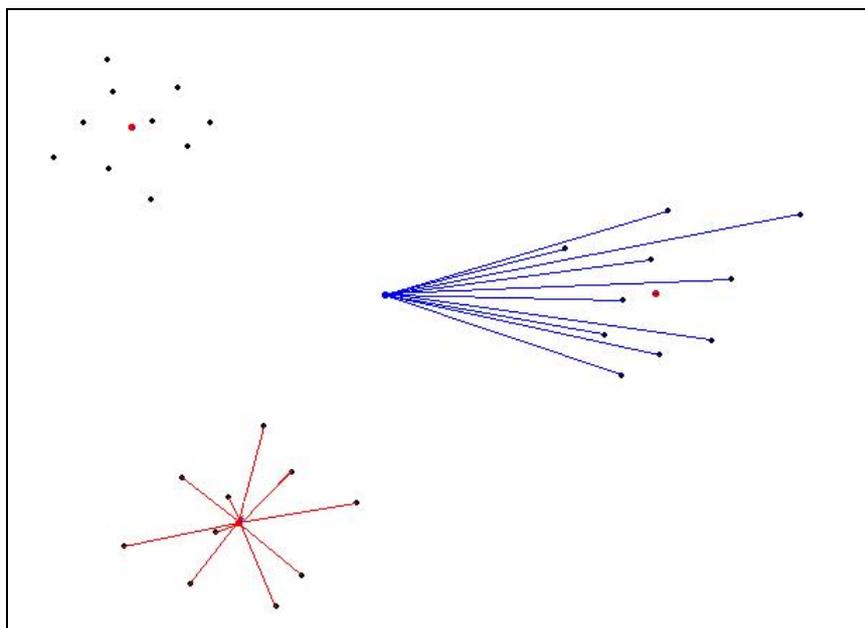
In Abbildung 15 sind die Bögen, die Versuchsperson 6 nachgezeichnet hat, dargestellt, zusammen mit den Punkten für den blinden Fleck.

Abbildung 15: Blue Arcs der Versuchsperson 6, Achsen in  $1^\circ$  Schritten unterteilt



Wie man sieht, ist die Varianz der Bögen über alle Durchgänge hier sehr gering, es gab natürlich auch Probanden mit größeren Schwankungen – die Darstellungen für alle Versuchspersonen sind im Anhang zu finden. Wenn man sich alle Ergebnisse betrachtet, deutet sich bereits an, dass die Varianzen zwischen den Personen größer sind als die Varianzen innerhalb einer Person.

Abbildung 16: Berechnung der Varianzen der Datenpunkte



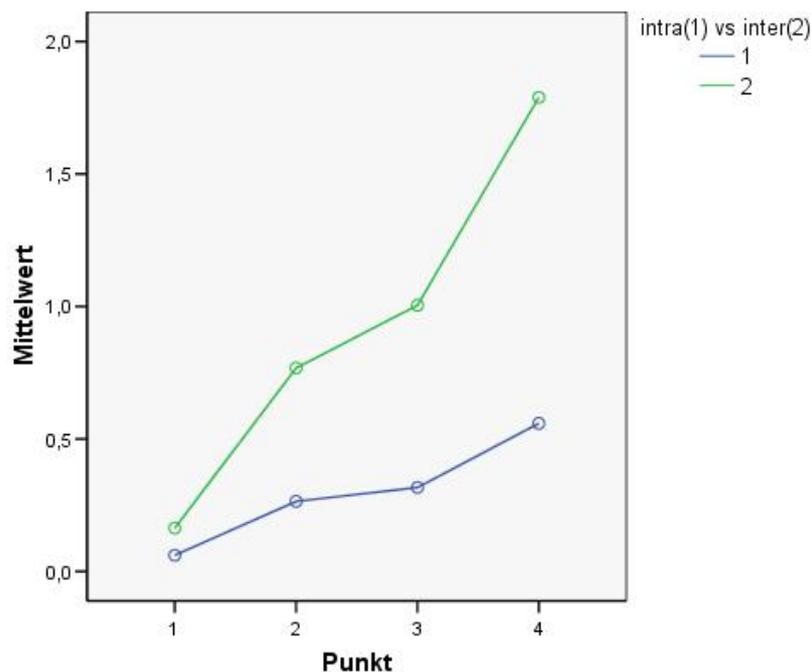
Natürlich wurde, um diese Frage zu klären, ein Signifikanztest gerechnet, allerdings mussten dafür erst einmal Varianzmaße aus den Daten errechnet werden. Die Vorgehensweise bei dieser Berechnung ist in Abbildung 16 veranschaulicht, hier sind exemplarisch Datenpunkte für einen der 4 Punkte von 3 verschiedenen Personen über alle 10 Durchgänge schwarz dargestellt. Über eine Mittelung der X- und Y-Koordinaten dieser Punkte wurde für jede Person ein intraindividueller Mittelpunkt errechnet, hier dargestellt in rot. Mittelt man alle Punkte aller Personen, so erhält man einen interindividuellen Mittelpunkt, im Bild blau gezeichnet. Nun werden die Distanzen von den Datenpunkten einer Person zum intraindividuellen Mittelpunkt (als rote Linien dargestellt) errechnet, gemittelt und noch mit dem Faktor  $m/(m-1)$  korrigiert ( $m=10$  Durchgänge) – das ergibt ein Maß für die Varianz innerhalb einer Person. Bestimmt man nun noch die Distanzen von den Punkten derselben Person zum interindividuellen Mittelpunkt, mittelt diese und korrigiert wieder um  $m/(m-1)$ , so erhält man ein Maß für die Varianz zwischen den Personen. Diese errechneten Werte sind in Tabelle 1 angeführt, die kompletten Rohwerte sind im Anhang zu finden. In den Spalten, die mit „Intra“ bezeichnet sind, sind die Werte für die intraindividuelle Varianz zu finden und in den Spalten, welche mit „Inter“ gekennzeichnet sind, die Werte für die interindividuelle Varianz. Auch in dieser Darstellung ist sofort ersichtlich, dass die Werte der Varianz zwischen den Personen größer sind als innerhalb der Person, jedoch muss jetzt noch gezeigt werden, ob dieser Unterschied auch signifikant ist.

*Tabelle 1: Errechnete Varianzmaße, in Grad Schwinkel*

Proband	Punkt 1		Punkt 2		Punkt 3		Punkt 4	
	Intra	Inter	Intra	Inter	Intra	Inter	Intra	Inter
1	,02	,03	,25	,69	,41	,51	,86	,90
2	,21	,62	,18	1,45	,21	1,02	,15	1,30
3	,07	,11	,42	,53	,66	,79	1,19	1,36
4	,09	,18	,67	,72	,52	,89	,49	,58
5	,01	,02	,05	,62	,06	,08	,19	1,12
6	,00	,01	,14	,18	,16	,29	,42	,77
7	,03	,12	,14	,30	,20	1,26	,52	2,88
8	,02	,04	,50	1,68	,56	1,47	,97	1,32
9	,10	,34	,03	,74	,07	2,73	,24	5,87

Da diese Distanzmaße normalverteilt waren, wurde mit den Daten eine zweifaktorielle Varianzanalyse für Messwiederholung mit den Faktoren Punkt (4 Stufen) und intra- vs. interindividuelle Varianz (2 Stufen) gerechnet. Mittels eines Mauchly-Tests wurde gezeigt, dass die Sphärizität bei diesen Daten nicht gegeben war, daher musste für den Faktor Punkt und die Wechselwirkung eine Korrektur der Freiheitsgrade nach Greenhouse-Geisser durchgeführt werden. Für die Faktoren Punkt ( $p=0,009^{**}$ ) und intra- vs. interindividuelle Varianz ( $p=0,028^*$ ) ergaben sich signifikante Unterschiede, eine Wechselwirkung schien nicht vorhanden zu sein ( $p=0,13$ ). Eine Darstellung der Mittelwerte für beide Faktoren ist in Abbildung 17 zu sehen. Die Varianz von Punkt 1 war signifikant kleiner ( $p=0,004^{**}$ ) als für alle anderen Punkte. Bei Punkt 4 war die Varianz signifikant größer als bei Punkt 1 ( $p=0,004^{**}$ ) und Punkt 3 ( $p=0,02^*$ ), jedoch nur tendenziell größer als bei Punkt 2 ( $p=0,061$ ). Interindividuelle Varianzen waren generell größer als intraindividuelle Varianzen ( $p=0,028^*$ ).

Abbildung 17: Mittelwerte der Faktoren Punkt und intra- vs. interindividuelle Varianz



Es gab keinen Zusammenhang, noch nicht einmal einen tendenziellen, zwischen der Position des blinden Flecks und der Länge der Blue Arcs ( $r=0,012$ ), auch nicht zwischen der Position der einzelnen Punkte der Bögen und dem blinden Fleck (alle Korrelationen nahezu 0).

## 5. Diskussion

Die Ergebnisse der Inzidenzstudie (siehe Abb. 14) sagen, dass 88% aller farbtüchtigen Personen das Blue Arc Phänomen wahrnehmen konnten. Es stellt sich die Frage, warum 12% dazu nicht in der Lage waren. Für das Experiment wurde darauf geachtet, die Bedingungen möglichst optimal zu halten, also einen Lichtreiz mittlerer Intensität zu benutzen, eine gute Abdunkelung zu schaffen und die Probanden zwischen den Stufen wieder zu lichtadaptieren. Möglicherweise ist ein Lichtpunkt nicht der optimale Stimulus, vielleicht wäre ein Lichtbalken vorzuziehen – oder manche Personen benötigen eine höhere oder niedrigere Stimulusintensität. Andererseits könnte es sein, dass für diese Probanden die Instruktion nicht ausreichend war, um die Bögen wahrzunehmen, obwohl auf verschiedene Möglichkeiten hingewiesen wurde, die Blue Arcs zu sehen und wie sich diese manifestieren. Schließlich wird auch in der Literatur immer darauf hingewiesen, dass ein geübter Beobachter die Bögen sehen kann – was impliziert, dass ein ungeübter Beobachter das eher nicht kann. Dies wird auch durch diese Inzidenzstudie bestätigt, konnten doch nur 10% der farbtüchtigen Versuchspersonen ohne weitere Vorinformation die Blue Arcs sehen – und je mehr Information mitgeteilt wurde, um so mehr Personen konnten sie wahrnehmen. Vielleicht konnten manche Personen die blauen Bögen aber auch nicht deutlich genug erkennen und vermeinten, stattdessen Form B der Alternativen zu sehen (siehe Abb. 12), denn es berichteten 2 farbtüchtige Personen (sowie ein Achromat), die die Bögen nicht sehen konnten, diese elliptische Form zu sehen. Andererseits meinte eine Person, sowohl die Bögen als auch die elliptische Form zu sehen – jedoch war dies nur ein einzelner Fall.

Eine weitere Ursache dafür, dass die 12% der Farbtüchtigen die Bögen nicht sehen konnten, könnte aber auch in Netzhautdefekten liegen, welche jene Strukturen betreffen, die für die Entstehung der Blue Arcs verantwortlich sind. Welche Strukturen dies sein mögen, konnte diese Studie auch nicht klären und aufgrund der Schwierigkeiten bei der Rekrutierung von Personen mit seltenen Farbstörungen wie Tritanopie können auch nicht viele ausgeschlossen werden. Aus der Literatur geht hervor, dass die kurzwelligen Zapfen und die Stäbchen (bzw. die weiter verschaltenden Zellen dieser Rezeptoren) in Verdacht stehen, die blauen Bögen zu erzeugen, während mittel- und langwellige Zapfen kaum einen Einfluss darauf haben sollten. Da in der Inzidenzstudie die Werte der Deuteranomalien – also der Personen, bei denen die mittelwelligen Zapfen nur verringert funktionsfähig sind – mit den Werten der Farbtüchtigen sehr gut übereinstimmen, deutet dieser Befund auch in die Richtung, dass mittelwellige Zapfen offenbar nicht alleine an der Entstehung der blauen Bögen beteiligt sind. Leider sind die Ishihara-Farbtafeln nicht geeignet, um festzustellen, ob sich nur Farbschwache in dieser

Gruppe befanden oder auch richtige Dichromaten, jedoch war auch kein anderer transportabler Test vorhanden, um diese Unterscheidung treffen zu können – daher wurden alle in dieser Gruppe als Deuteranomal bezeichnet. Für weitere Untersuchungen wären auf jeden Fall bereits diagnostizierte Dichromaten vorzuziehen.

Von den Achromaten konnte nur eine Person mit teilweiser Achromatopsie die Bögen wahrnehmen und eine weitere (ebenfalls mit teilweiser Achromatopsie) berichtete, Form B der Alternativen zu sehen. Da bei teilweiser Achromatopsie die Zapfen noch eingeschränkt funktionsfähig sind und die vollständigen Achromaten die Bögen nicht wahrnehmen konnten, stützt dieser Befund die Aussagen von Alpern & Dudley (1966), nach denen Zapfen auf jeden Fall involviert sind, sei es auch nur für die primäre Erregung. Um diese Aussage mit größerer Sicherheit treffen zu können, müsste man eine größere Gruppe von Stäbchenmonochromaten untersuchen, diese dürften laut Theorie die Bögen nicht sehen können. Auch die Theorie, dass die kurzwelligen Zapfen verantwortlich sind für die Blue Arcs, konnte mit dieser Studie gestützt werden – oder zumindest nicht widerlegt. Will man diese Vermutung näher untersuchen, so bräuchte man eine Gruppe von Personen mit Tritanopie, bei denen eben diese Zapfen nicht funktionieren – leider war es mir trotz mehrerer Anfragen bei Augenkliniken in Graz, Wien und Tübingen nicht vergönnt, solche Probanden zu finden. Weitere Untersuchungen mit Personen, die unter Farbstörungen leiden, sollten angestrebt werden, um mehr Licht auf die Ursachen der Blue Arcs zu werfen.

Was die Frage nach den farbtüchtigen Personen, die die Bögen nicht sehen können, betrifft, zeigte sich noch ein interessanter Befund – von diesen 9 Personen war nur eine weiblich. Da bei Stufe 4 der Untersuchung noch 20 Männer und 12 Frauen die Blue Arcs nicht wahrnehmen konnten, wäre es möglich, dass die Frauen in der letzten Stufe eher im Sinne sozialer Erwünschtheit antworteten. Wäre dem so, müssten die Prozentzahlen der Inzidenz in der letzten Stufe noch nach unten korrigiert werden, als Versuchsleiter hatte ich jedoch nicht das Gefühl, dass die Antworten der Probanden auf sozialer Erwünschtheit beruhen. Eine alternative Erklärung wäre, dass das Nichtsehen der Blue Arcs auf Dysfunktionen der Netzhaut zurückzuführen ist und diese Dysfunktionen genetische Ursachen haben könnten. Mittels genauer augenärztlicher Untersuchung der Netzhaut solcher Personen – welche die Bögen nicht wahrnehmen – könnte man diese Hypothese überprüfen.

Was den Versuch zum Formabgleich angeht, so konnte hier gezeigt werden, dass mit einfachen Mitteln ein computergestützter Experimentalaufbau herstellbar ist, bei dem die blauen Bögen gut genug sichtbar sind, um einen Formabgleich durchzuführen. Nach einigen Optimierungsschritten konnte der Stimulus direkt vom Computer erzeugt werden, dadurch ist

der Stimulus so einstellbar, wie man ihn für das Experiment gerade braucht. Allerdings funktionierte dieser Stimulus nur, wie bereits erwähnt, auf einem kontraststarken, dunkel eingestellten CRT-Monitor. Der Formabgleich war präzise genug, um zu zeigen, dass die Bögen bei gleich bleibendem Fixationspunkt innerhalb einer Person relativ formkonstant sind und sich diese Bögen zwischen den Personen unterscheiden lassen. Zwischen den einzelnen Punkten des Splines, mit dem die Bögen nachgezeichnet wurden, zeigte sich ebenfalls ein Effekt – die Varianz von Punkt 1 war die niedrigste und die Varianz von Punkt 4 die höchste. Dieses Ergebnis ist nachvollziehbar, da der Stimulus ein Balken war und die Bögen vermutlich bereits innerhalb des Balkens begannen, dort jedoch vom Licht des Stimulus überstrahlt wurden – daher beginnen die nachgezeichneten Bögen alle sehr knapp am Balken, was die geringe Variation von Punkt 1 erklären würde. Dass Punkt 4 so stark variiert ist ebenfalls verständlich, da dieser Punkt am weitesten in der Peripherie und bereits außerhalb des Bereichs der Macula liegt. Daher ist es klar, dass dieser Punkt am schwierigsten exakt zu bestimmen ist und dadurch stärker variiert. Punkt 2 und Punkt 3, die noch innerhalb der Macula liegen, unterscheiden sich nicht in ihrer Varianz.

Es zeigte sich kein Zusammenhang zwischen der Länge der nachgezeichneten Bögen bzw. den einzelnen Punkten der Bögen und der Position des blinden Flecks. Dieses Ergebnis war zu erwarten, da die Länge der Bögen nur von der Position des Fixationspunktes relativ zum Stimulus abhängig sein sollte, wie man sehr schön im Artikel von Dolecek & DeLaunay (1945) sehen kann. Ändert man den Fixationspunkt, so können die Bögen auch näher zum blinden Fleck gehend gesehen werden oder schon weiter davor enden. Das bedeutet allerdings nicht, dass die Bögen immer gleich lang wären – warum die Bögen manchmal länger oder kürzer gesehen werden und wie weit sie bis an den blinden Fleck heranreichen, ist nach wie vor nicht geklärt. Ein Zusammenhang scheint auf jeden Fall nur mit der Wahl des Fixationspunktes gegeben zu sein. Auch Amberson (1924) hat die Länge der Bögen und die Entfernung von Fovea bis zum blinden Fleck erhoben, ohne jedoch eine Korrelation zu rechnen – mit jenen Zahlen ergibt sich aber ebenso eine Korrelation nahe Null wie in dieser hier vorliegenden Studie.

Die Ergebnisse dieser Untersuchung demonstrieren, dass man einfache computergestützte Experimente mit programmgeneriertem und damit gut modulierbarem Stimulus für das Blue Arc Phänomen herstellen kann, was vielleicht das Interesse an diesem kuriosen und weithin unbekanntem Phänomen wieder etwas stärkt.

## **6. Literatur:**

Alpern, M. & Dudley, D. (1966). The Blue Arcs of the Retina. *The Journal of General Physiology*, 49, 405 -421.

Amberson, W.R. (1924). Secondary Excitation in the Retina. *American Journal of Physiology*, 69, 354-370.

Dolecek, R.L. & DeLaunay, J. (1945). Entoptic Mapping of the Purkinje Blue Arcs. *Journal of the Optical Society of America*, 35, 10, 676-680.

Dowling, J.E. (1987). *The Retina: An Approachable Part of the Brain*, Cambridge, MA: Harvard University Press.

Gertz, H. (1905). Ueber entoptische Wahrnehmung des Actionsstroms der Netzhautfasern. *Zentralblatt für Physiologie*, 19, 229-232.

Goldstein, E.B. (2002). *Wahrnehmungspsychologie*. Heidelberg: Spektrum.

Kandel, E.R., Schwartz, J.H. & Jessell, T.M. (1996). *Neurowissenschaften*. Heidelberg: Spektrum.

Ladd-Franklin, C. (1926). The Reddish Blue Arcs and the Reddish Blue Glow of the Retina: Seeing your own nerve currents through bioluminescence. *Proc.N.A.S.*, 12, 413-414.

Newhall, S.M. (1937). The Constancy of the Blue Arc Phenomenon. *Journal of the Optical Society of America*, 27, 165-176.

Pasquale, L.R. (2002). Blue Arc Entoptic Phenomenon for Detecting Glaucomatous Visual Field Loss. *Asian Journal of Ophthalmology*, 4, 2, 11-12.

Purkinje, J.E. (1825). *Beobachtungen und Versuche zur Physiologie der Sinne*, 2, 74-78. Berlin: Reimer.

Wolfe, J.M. (1991). The blue arcs: An electrifying visual phenoma. *Optics & Photonics News* 5/1991.

**7. Anhang***Mobile Untersuchungsbox*

**Rohdaten der Inzidenzstudie****Farbtüchtige:**

Alter	Geschlecht	Stufe 1	Stufe 2	Stufe 3	Stufe 4	Stufe 5	Sehstörung
25	M	0	0	0	1	1	
24	M	0	0	1	1	1	
26	M	0	0	0	1	1	1 Dpt Kurz
25	M	0	0	0	1	1	
26	M	0	1	1	1	1	
26	W	0	1	1	1	1	
26	M	0	0	0	0	1	
24	M	0	0	0	0	1	
24	M	0	0	0	1	1	
26	W	0	0	1	1	1	2,5 Dpt Weit
27	M	0	0	0	0	0	
28	W	0	0	0	1	1	7 Dpt Kurz
20	M	0	0	0	1	1	0,75 Dpt Kurz
29	M	0	0	0	1	1 (und B)	30% Mehr Farbsicht
22	W	0	0	0	0	1	5 Dpt Kurz
25	M	0	0	0	0	1	
26	M	0	0	0	0	0	1 Dpt Kurz
26	W	0	0	0	0	1	
32	M	0	0	1	1	1	
29	M	0	0	0	0	1	
25	W	0	0	0	0	1	3 Dpt Kurz
25	M	0	0	0	0	0 (nur B)	
29	M	0	0	0	0	0	
24	M	0	0	0	1	1	2 Dpt Kurz
63	M	0	0	0	0	1	3 Dpt Weit
25	M	0	1	1	1	1	
27	M	0	0	0	1	1	
17	W	0	0	0	0	1	1 Dpt Kurz
23	M	0	0	1	1	1	
24	M	0	0	0	0	1	1 Dpt Kurz
26	M	0	0	0	1	1	
42	W	0	0	0	0	1	
27	M	0	0	0	0	0 (nur B)	3 Dpt Kurz
27	M	0	0	0	1	1	
60	W	0	0	0	0	1	1,5 Dpt Weit
26	W	0	0	1	1	1	
25	M	1	1	1	1	1	
26	W	0	1	1	1	1	
26	W	0	0	0	1	1	2 Dpt Kurz
25	W	0	0	0	0	1	
25	M	0	0	0	0	1	1 Dpt Kurz
26	M	0	0	0	0	1	1,5 Dpt Kurz
25	W	0	0	1	1	1	
26	W	0	0	0	1	1	
20	M	0	0	0	0	1	
22	M	0	0	0	1	1	
25	M	0	0	0	0	1	
24	W	0	0	0	1	1	
22	M	0	0	0	0	1	
25	M	0	0	1	1	1	
28	W	0	0	0	1	1	3 Dpt Kurz

Alter	Geschlecht	Stufe 1	Stufe 2	Stufe 3	Stufe 4	Stufe 5	Sehstörung
25	M	0	0	0	1	1	
23	M	0	0	0	0	1	
23	W	0	0	1	1	1	
22	W	0	0	0	0	1	2 Dpt Kurz
25	W	0	0	0	1	1	0,75 Dpt Kurz
24	M	0	0	0	1	1	0,75 Dpt Kurz
23	W	0	0	0	0	1	5 Dpt Kurz
24	W	0	1	1	1	1	0,75 Dpt Kurz
22	W	0	0	0	1	1	
23	W	0	0	0	1	1	
24	W	0	0	0	0	0	4 Dpt Kurz
49	M	0	0	0	0	0	1 Dpt Weit
23	W	0	0	0	1	1	
23	M	0	1	1	1	1	
21	M	0	0	0	1	1	
52	W	0	0	0	1	1	2 Dpt Weit
23	M	0	0	0	0	0	2 Dpt Kurz
33	W	0	1	1	1	1	
26	M	0	0	0	1	1	
25	M	0	0	0	1	1	
22	M	0	0	0	0	0	
23	W	0	0	0	1	1	2 Dpt Kurz
26	W	0	0	0	1	1	0,5 Dpt Kurz
27	W	0	0	0	0	1	
24	M	0	0	0	1	1	
25	W	0	0	0	0	1	

### Deuteranomale:

Alter	Geschlecht	Stufe 1	Stufe 2	Stufe 3	Stufe 4	Stufe 5	Sehstörung
55	W	0	0	0	0	1	Deuteranomalie
32	M	0	0	1	1	1	Deuteranomalie
31	M	0	1	1	1	1	Deuteranomalie
34	M	0	0	1	1	1	Deuteranomalie
18	M	0	0	1	1	1	Deuteranomalie
26	M	0	0	0	1	1	Deuteranomalie
28	M	0	0	0	0	1	Deuteranomalie
26	W	0	0	0	0	1	Deuteranomalie
25	M	0	0	0	0	0	Deuteranomalie
25	M	0	0	0	0	0	Deuteranomalie

### Achromaten:

Alter	Geschlecht	Stufe 1	Stufe 2	Stufe 3	Stufe 4	Stufe 5	Sehstörung
16	M	0	0	0	0	0 (nur B)	tw. Achromatopsie
16	M	0	0	1	1	1 (grau)	tw. Achromatopsie
41	W	0	0	0	0	0	tw. Achromatopsie
32	W	0	0	0	0	0	tw. Achromatopsie
17	W	0	0	0	0	0	Achromatopsie
16	W	0	0	0	0	0	Achromatopsie

**Rohdaten der Formabgleichstudie**

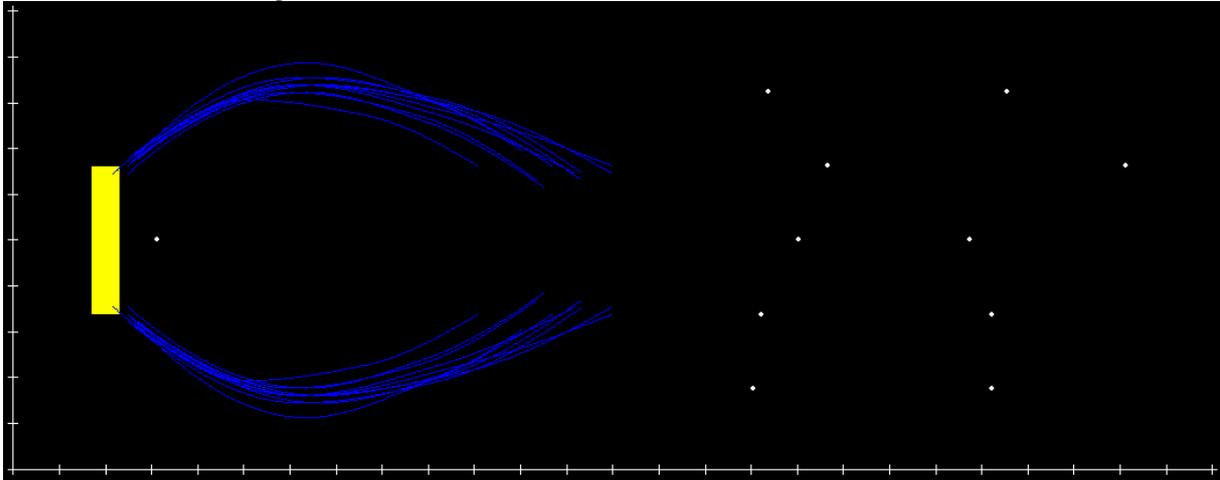
(Alle Einträge in Grad Schwinkel, vom Mittelpunkt des Stimulus gerechnet)

Durchgang	Punkt 1		Punkt 2		Punkt 3		Punkt 4	
	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
1	0,48	1,61	4,36	3,87	7,02	3,07	9,68	1,61
2	0,48	1,61	4,68	3,39	6,86	3,07	9,04	1,94
3	0,48	1,61	3,07	3,07	5,57	2,74	8,07	1,61
4	0,48	1,45	4,36	3,23	6,94	2,58	9,52	1,13
5	0,48	1,61	4,04	3,23	6,7	2,74	9,36	1,29
6	0,16	1,45	4,2	3,39	7,18	2,74	10,17	1,45
7	0,48	1,78	4,2	3,55	7,26	3,07	10,33	1,45
8	0,48	1,61	4,36	3,39	7,67	2,74	10,98	1,61
9	0,48	1,78	4,36	3,39	7,67	2,91	10,98	1,45
10	0,48	1,61	4,68	3,55	7,51	2,91	10,33	1,29
1	0,32	0,81	2,26	2,58	5,81	3,55	9,36	1,13
2	0,32	0,16	2,91	2,74	5,73	3,23	8,55	1,61
3	0,32	0,65	2,91	2,58	5,89	3,23	8,88	1,61
4	0,48	1,13	2,91	2,26	5,73	2,58	8,55	1,61
5	0,16	1,61	2,91	2,58	5,73	2,91	8,55	1,61
6	0,16	1,13	2,91	2,91	5,73	3,55	8,55	1,61
7	0,16	1,61	2,91	2,58	5,97	3,23	9,04	1,61
8	0,32	0,65	3,07	2,26	6,25	2,82	9,44	1,61
9	0,48	0,97	3,71	2,74	6,46	2,58	9,2	1,61
10	0,48	1,13	2,91	2,1	5,89	2,58	8,88	1,61
1	0,48	1,61	2,91	3,23	5,73	2,58	8,55	1,61
2	0,16	1,61	3,55	3,07	6,05	2,58	8,55	1,61
3	0,32	1,98	4,36	3,71	7,3	3,07	10,25	2,1
4	0,32	1,45	4,36	3,55	7,75	2,74	11,14	1,29
5	0	1,61	4,36	3,87	8,15	3,07	11,94	1,61
6	0,16	1,61	2,91	3,23	6,46	2,58	10,01	1,61
7	0,32	1,78	3,87	3,55	7,18	2,91	10,49	1,61
8	0,32	1,78	4,36	3,71	7,51	3,07	10,65	1,78
9	-0,16	1,29	3,71	3,55	6,94	2,91	10,17	1,94
10	0,32	1,61	4,36	3,71	7,67	3,07	10,98	1,78
1	0,65	1,29	2,74	3,07	6,05	3,87	9,36	1,94
2	0,48	1,78	2,91	3,07	6,05	3,55	9,2	1,45
3	0,48	1,45	2,91	3,23	6,13	3,87	9,36	1,78
4	0,48	1,94	3,07	3,39	6,38	3,87	9,68	1,94
5	0,48	1,94	4,36	3,71	6,94	3,23	9,52	1,45
6	0,81	1,78	4,52	3,55	7,75	3,87	10,98	2,1
7	0,48	2,1	4,04	3,55	6,86	3,23	9,68	2,26
8	0,48	2,1	4,36	3,87	7,1	3,39	9,85	2,1
9	0,32	1,78	4,68	3,87	7,83	3,23	10,98	1,61
10	0,48	2,1	3,71	3,71	6,78	3,23	9,85	2,1
1	0,48	1,61	2,91	3,79	7,1	3,07	11,3	1,78
2	0,48	1,53	2,82	3,47	6,82	2,91	10,81	1,45
3	0,48	1,61	2,82	3,31	6,66	2,82	10,49	1,45
4	0,48	1,61	2,91	3,55	6,78	2,74	10,65	0,97
5	0,48	1,61	2,91	3,55	6,94	2,66	10,98	1,05
6	0,48	1,78	2,91	3,71	6,86	2,91	10,81	1,29
7	0,48	1,78	3,23	3,79	6,94	2,91	10,65	1,45
8	0,32	1,61	2,91	3,47	6,48	2,58	10,05	1,01

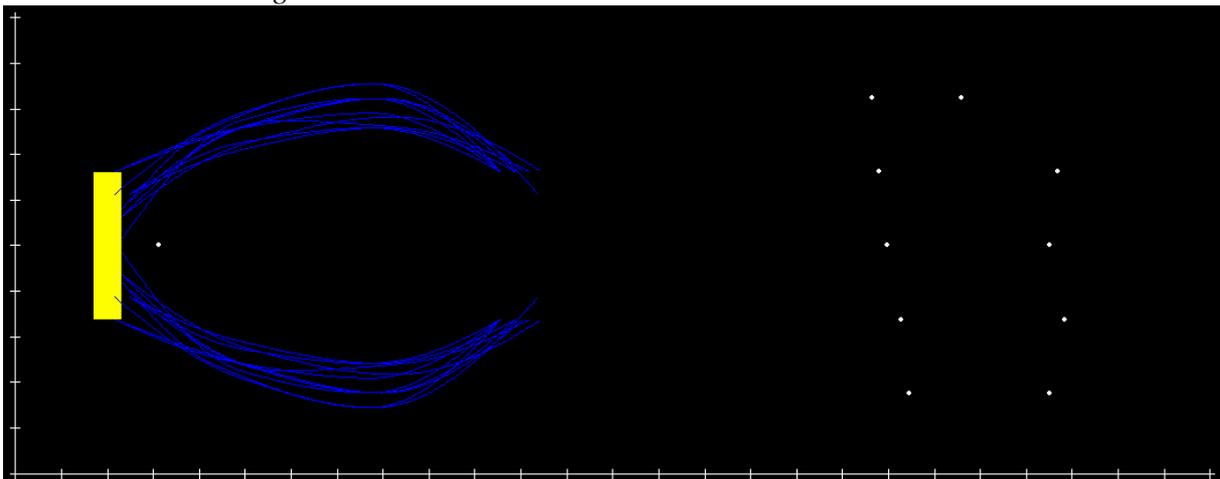
Durchgang	Punkt 1		Punkt 2		Punkt 3		Punkt 4	
	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
9	0,48	1,61	2,91	3,79	6,86	2,99	10,81	0,97
10	0,48	1,61	3,15	3,63	7,06	2,91	10,98	1,05
1	0,48	1,61	3,71	3,39	7,51	2,74	11,3	1,61
2	0,48	1,61	3,87	3,39	7,51	2,74	11,14	1,61
3	0,48	1,61	3,23	3,23	7,02	2,74	10,81	1,45
4	0,48	1,61	2,91	3,39	6,7	2,74	10,49	1,61
5	0,48	1,61	2,91	3,23	6,86	2,58	10,81	1,61
6	0,48	1,61	3,39	3,23	6,46	2,58	9,52	1,61
7	0,48	1,61	3,87	3,39	7,42	2,74	10,98	1,61
8	0,48	1,61	3,71	3,39	6,78	2,74	9,85	1,61
9	0,48	1,61	3,71	3,23	6,78	2,74	9,85	1,61
10	0,48	1,61	3,23	3,23	6,54	2,58	9,85	1,29
1	0,48	1,61	4,52	3,71	7,99	2,74	11,46	1,29
2	0,48	1,61	4,04	3,55	8,07	2,74	12,11	1,61
3	0,97	1,78	4,36	3,39	7,99	2,74	11,62	1,61
4	0,81	1,94	3,71	3,23	7,18	2,58	10,65	1,45
5	0,65	1,61	4,04	2,91	7,18	2,42	10,33	1,61
6	0,65	1,61	3,87	3,39	7,26	2,58	10,65	1,61
7	0,65	1,61	3,55	3,23	7,18	2,42	10,81	1,29
8	0,65	1,61	3,87	3,23	8,07	2,42	12,27	0,97
9	0,65	1,61	3,71	3,39	7,75	2,91	11,78	1,61
10	0,65	1,61	4,2	3,23	7,99	2,58	11,78	1,13
1	0,65	1,78	4,84	4,68	7,51	4,68	10,17	3,39
2	0,32	1,78	4,36	4,36	7,26	4,04	10,17	1,94
3	0,65	1,61	4,36	4,04	6,7	3,55	9,04	2,26
4	0,48	1,78	4,2	4,04	6,62	3,71	9,04	2,26
5	0,48	1,61	4,84	4,04	7,91	3,87	10,98	2,42
6	0,48	1,61	4,2	3,39	6,94	3,07	9,68	1,78
7	0,48	1,61	5	3,71	7,51	3,39	10,01	1,61
8	0,48	1,61	3,55	3,39	7,34	4,04	11,14	2,1
9	0,48	1,61	5,49	3,55	8,39	3,39	11,3	1,94
10	0,48	1,61	4,2	3,39	6,86	3,07	9,52	1,45
1	-0,32	1,45	2,91	3,31	5,73	2,7	8,55	1,25
2	0,48	2,1	2,58	3,23	5,33	2,74	8,07	1,45
3	-0,16	1,78	2,91	3,23	5,33	2,91	7,75	1,94
4	-0,16	1,45	2,91	3,07	5,33	2,58	7,75	1,45
5	-0,16	1,61	2,91	3,23	5,49	2,58	8,07	1,29
6	-0,16	1,29	2,91	3,07	5,25	2,58	7,59	1,29
7	0	1,61	2,91	3,07	5,16	2,58	7,42	1,45
8	0	1,61	2,91	2,91	5	2,42	7,1	1,29
9	0	1,45	2,91	2,91	5,08	2,42	7,26	1,45
10	-0,16	1,45	2,74	3,03	5	2,5	7,26	1,45

**Graphische Darstellung der Ergebnisse des Formabgleichs:**  
(Achsen sind in 1° Schritten unterteilt)

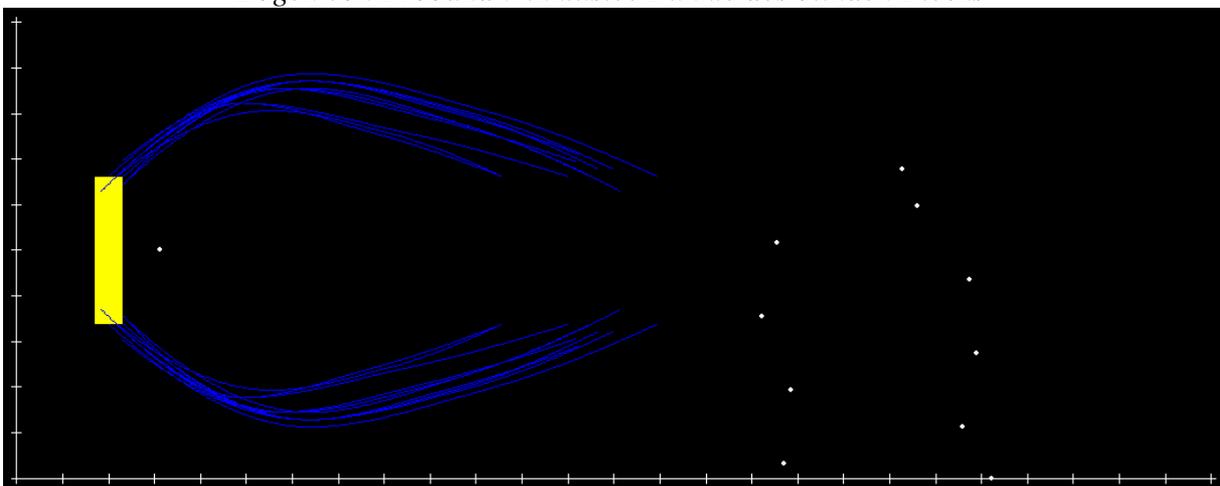
*Bögen von Proband 1 inklusive Punkte des blinden Flecks*



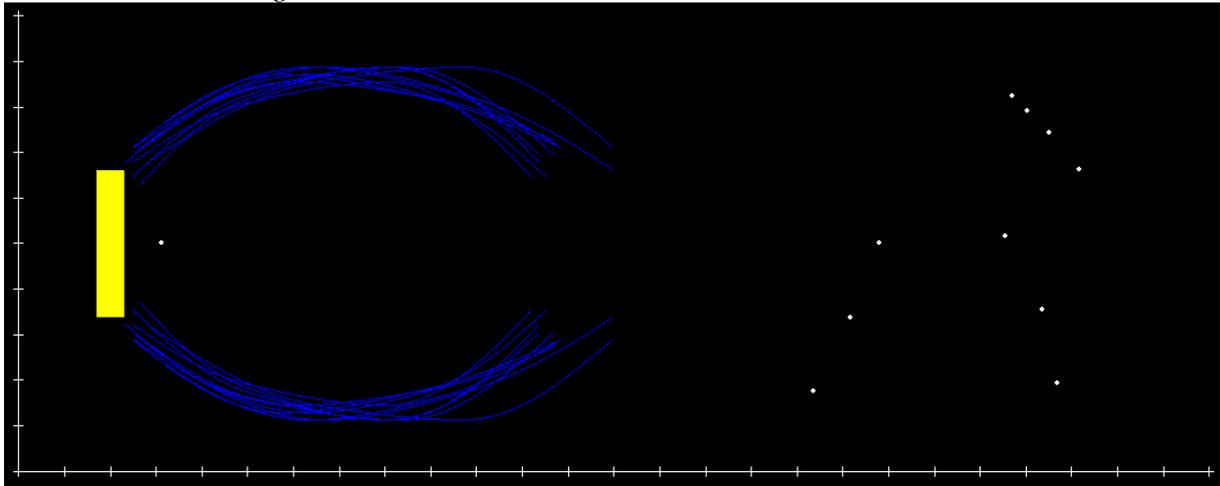
*Bögen von Proband 2 inklusive Punkte des blinden Flecks*



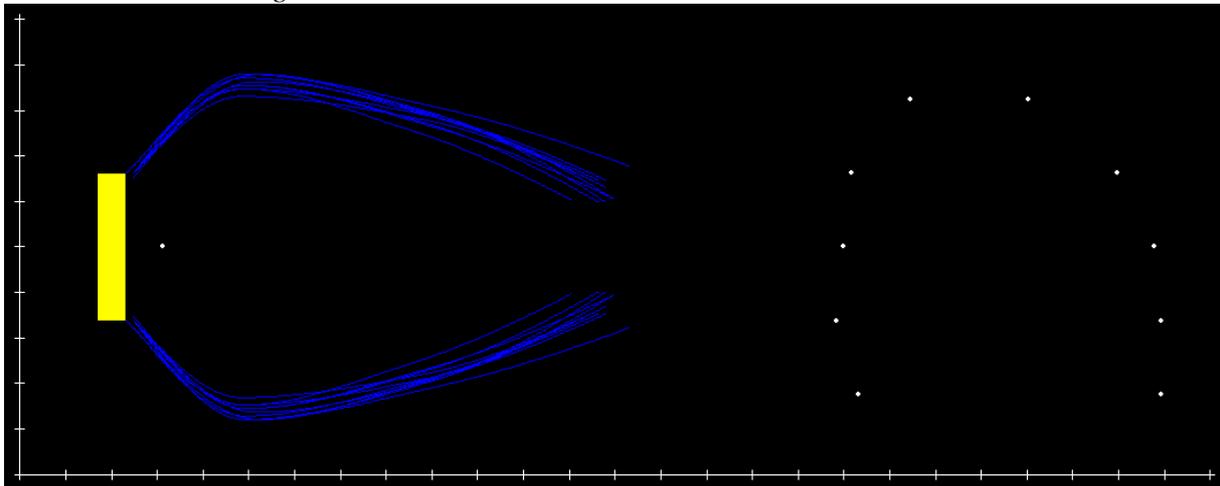
*Bögen von Proband 3 inklusive Punkte des blinden Flecks*



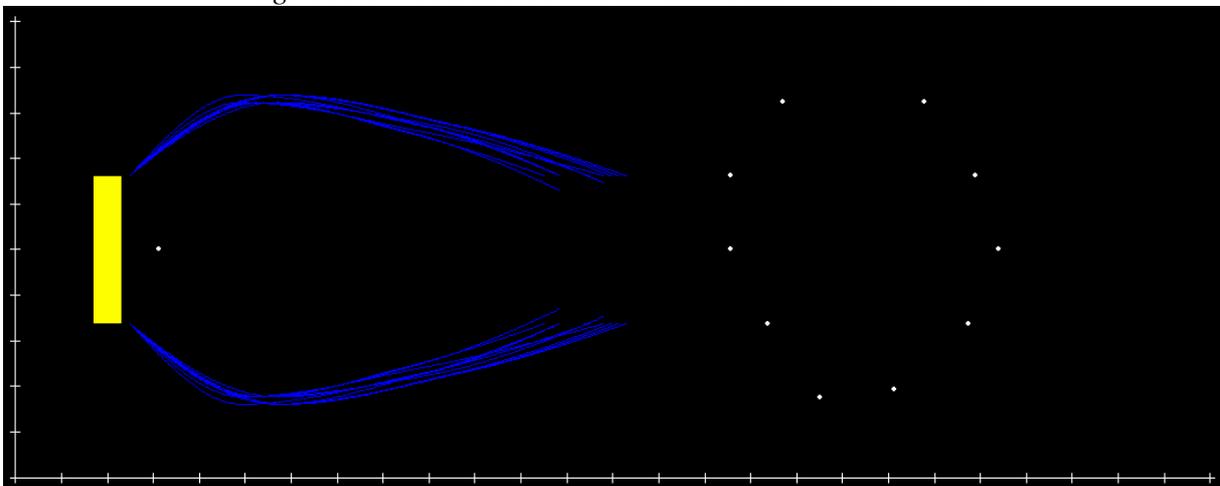
*Bögen von Proband 4 inklusive Punkte des blinden Flecks*



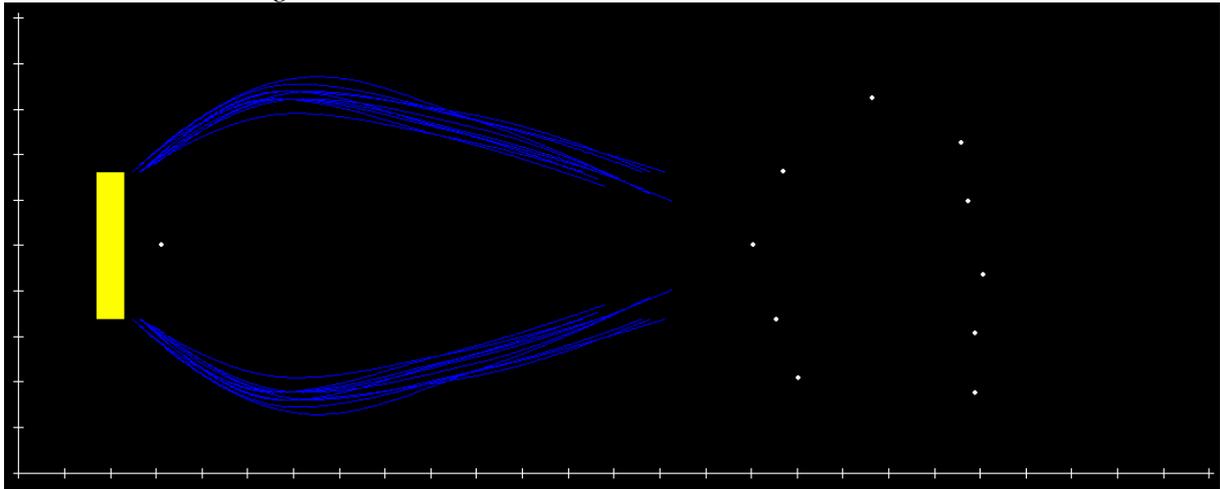
*Bögen von Proband 5 inklusive Punkte des blinden Flecks*



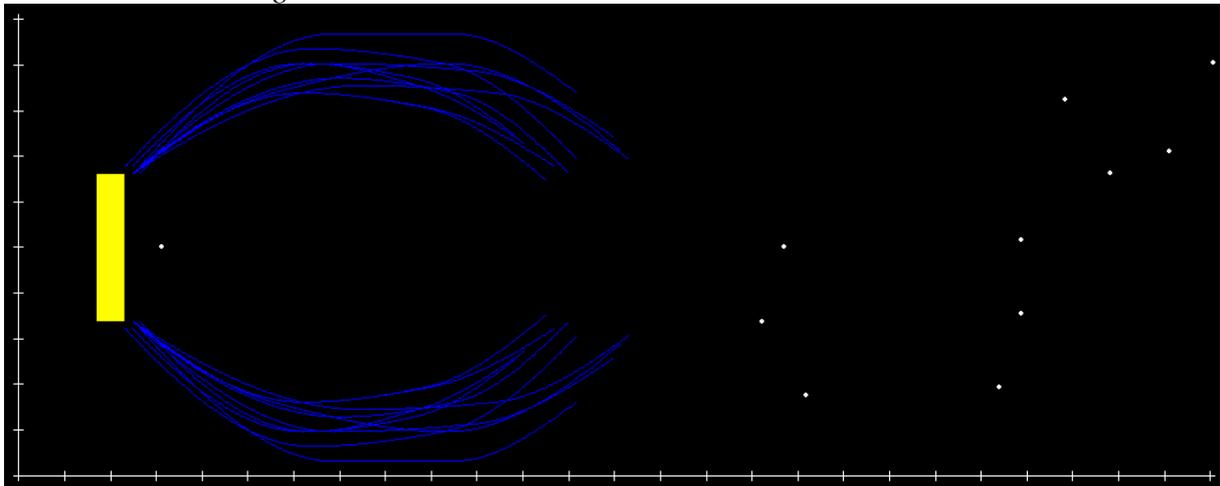
*Bögen von Proband 6 inklusive Punkte des blinden Flecks*



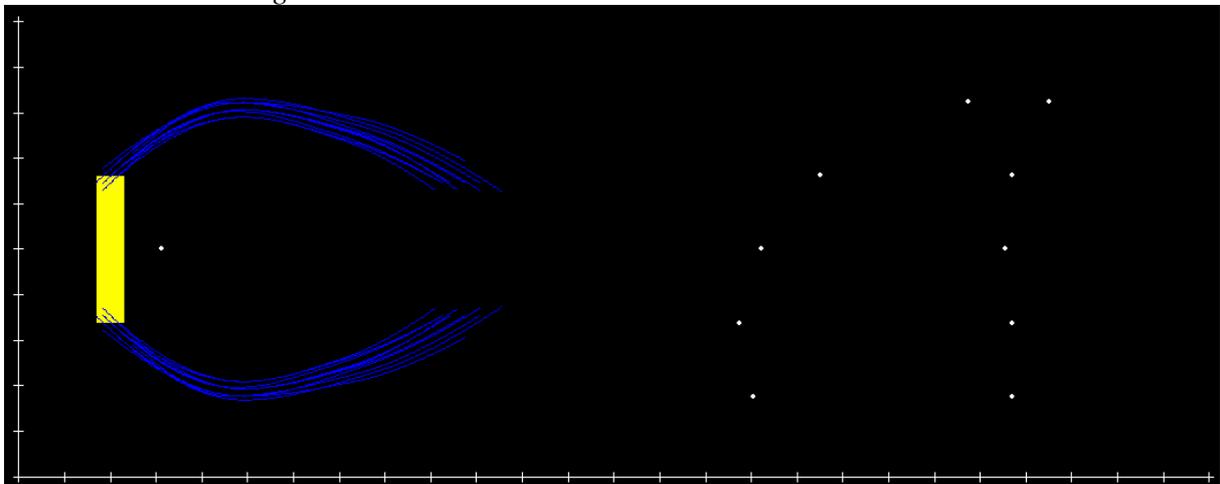
*Bögen von Proband 7 inklusive Punkte des blinden Flecks*



*Bögen von Proband 8 inklusive Punkte des blinden Flecks*



*Bögen von Proband 9 inklusive Punkte des blinden Flecks*



**Erhobene Punkte für die Position des blinden Flecks:**  
 (Angegeben in Grad Schwinkel, vom Mittelpunkt des Stimulus gerechnet)

Proband	X	Y	
1	14,3646	3,228	
	15,6558	1,614	
	15,0102	0	
	14,2032	-1,614	
	14,0418	-3,228	
	19,5294	3,228	
	22,1118	1,614	
	18,7224	0	
	19,2066	-1,614	
	19,2066	-3,228	
	2	16,6242	3,228
		16,7856	1,614
		16,947	0
		17,2698	-1,614
17,4312		-3,228	
18,561		3,228	
20,6592		1,614	
20,4978		0	
20,8206		-1,614	
20,4978		-3,228	
3		17,2698	1,7754
		14,526	0,1614
		14,2032	1,4526
		14,8488	-3,0666
	14,6874	-4,6806	
	17,5926	0,9684	
	18,7224	-0,6456	
	18,8838	-2,2596	
	18,561	-3,8736	
	19,2066	-5,0034	
	4	19,6908	3,228
		21,1434	1,614
		16,7856	0
		16,14	-1,614
15,333		-3,228	
20,0136		2,9052	
20,4978		2,421	
19,5294		0,1614	
20,3364		-1,4526	
20,6592		-3,0666	
5		17,4312	3,228
		16,14	1,614
		15,9786	0
		15,8172	-1,614
	16,3014	-3,228	
	20,0136	3,228	
	21,9504	1,614	
	22,7574	0	
	22,9188	-1,614	

6	22,9188	-3,228
	14,6874	3,228
	13,5576	1,614
	13,5576	0
	14,3646	-1,614
	15,4944	-3,228
	17,754	3,228
	18,8838	1,614
	19,368	0
	18,7224	-1,614
7	17,1084	-3,0666
	16,6242	3,228
	14,6874	1,614
	14,0418	0
	14,526	-1,614
	15,0102	-2,9052
	18,561	2,2596
	18,7224	0,9684
	19,0452	-0,6456
	18,8838	-1,9368
8	18,8838	-3,228
	20,8206	3,228
	21,789	1,614
	14,6874	0
	14,2032	-1,614
	15,1716	-3,228
	24,0486	4,035
	23,0802	2,0982
	19,8522	0,1614
	19,8522	-1,4526
9	19,368	-3,0666
	18,7224	3,228
	15,4944	1,614
	14,2032	0
	13,719	-1,614
	14,0418	-3,228
	20,4978	3,228
	19,6908	1,614
	19,5294	0
	19,6908	-1,614
19,6908	-3,228	

## MATLAB – Programme für den Formabgleich

```
function bluearc
```

```
% Programm zum Formabgleich der blauen Bögen des Blue Arc Phenomenon,
% benötigt auch bluearckeypress und bluearcchange.
% Leertaste schaltet um zwischen Seh-Modus und Abgleichmodus, Enter
% beendet den derzeitigen Durchgang. A und Q navigieren durch das
% Menü, Menüpunkte werden mit den Pfeiltasten durchgeführt. Zur
% feineren Einstellung 1 drücken, für gröbere Einstellung 2.
% Eine Logdatei mit dem Namen des Versuchspersonencodes wird erstellt,
% in der für jeden Durchgang die 4 Punkte des Splines gespeichert
% werden.
% Die ersten 4 Durchgänge sind nur Probedurchgänge zum Erlernen
% der Menünutzung (nachzeichnen der weissen Bögen).
```

```
global x;
global y;
global dfac;
global update;
global animate;
global showhalo;
global task;
global taskno;
global Doppelhalo;
global durchgang;
global xled;
global yled;
global logdatei;
global ledan;
global dio;
```

```
animate = 1;
update = 1;
showhalo = 1;
dfac = 0.1;
Doppelhalo=0;
durchgang=1;
```

```
xled=0;
yled=0;
```

```
bcol = 'k'; % background color
fcol = 'w'; % fixation cross color
lcol = 'r'; % LED color
hcol = 'b'; % blue arc color
tcol = [0.5 0.5 0.5]; % text color
mcol = 'g'; % highlighted text color
```

```
task = {'Schieben','P1','P2','P3Y','P4','Spiegeln','Doppelt'};
```

```

taskno = 1;

code=inputdlg('Versuchspersonencode eingeben:');
code=char(code);

%dio=digitalio('mcc',1);    %Ansteuerung des PMD, nur für externen Reiz
%addline(dio,7,0,'out');
%putvalue(dio,1);
ledan=0;

pos = get(0,'screensize');
pos(4)=pos(4)-16;
f = figure('paperpositionmode','manual','menubar','none','color',bcol,'position',pos);
set(f,'keypressfcn','bluearckeypress');
a = axes;
set(a,'xtick',[],'ytick',[],'color',bcol,'xcolor',bcol,'ycolor',bcol,'position',[0 0 1 1]);

x = [0.3 1.8 3.55 5.3];    %Anfangsposition der Bögen
y = [1.0 2.0 1.6 1.0];

set(gcf,'defaulttextfontsize',20);
set(gcf,'defaulttextcolor',tcol);

logdatei=fopen(sprintf('%s.log',code),'at');
fprintf(logdatei,'Start: %s\n',datestr(now));
fprintf(logdatei,'Stimulus-Position: \nX = %d\nY = %d\n',xled,yled);

r=0;

while animate
    if update
        hold off;
        set(gcf,'color',bcol);
        plot(xled,yled,','color',fcol);
        hold on;
        plot(-xled,yled,','color',fcol);
        if showhalo
            %plot(0,0,'o','color',lcol,'markerfacecolor',lcol);
            x(3)=(x(2)+x(4))/2;
            switch durchgang    %Probedurchgänge, weisse Bögen nachzeichnen
                case 1
                    x2=[1.3 2.5 7.8 6.7];
                    y2=[1.7 2.8 0.9 1.4];
                    [sx2,si2] = sort(x2);
                    sy2 = y2(si2);
                    xx2 = sx2(1):0.02:sx2(end);
                    plot(xx2,interp1(sx2,sy2,xx2,'cubic'),'color',fcol);
                case 2
                    x2=[-0.6 -1.85 -3.7 -5.15];
                    y2=[-1.45 -2.15 -1.8 -1.2];

```

```

[sx2,si2] = sort(x2);
sy2 = y2(si2);
xx2 = sx2(1):0.02:sx2(end);
plot(xx2,interp1(sx2,sy2,xx2,'cubic'),'color',fcol);
case 3
x2=[0.9 1.8 7.25 6.15];
y2=[-1.1 -2.1 -0.2 -0.7];
[sx2,si2] = sort(x2);
sy2 = y2(si2);
xx2 = sx2(1):0.02:sx2(end);
plot(xx2,interp1(sx2,sy2,xx2,'cubic'),'color',fcol);
sy2=-sy2;
plot(xx2,interp1(sx2,sy2,xx2,'cubic'),'color',fcol);
case 4
x2=[-0.3 -1.75 -5.4 -4.65];
y2=[1.0 2.1 0.2 0.7];
[sx2,si2] = sort(x2);
sy2 = y2(si2);
xx2 = sx2(1):0.02:sx2(end);
plot(xx2,interp1(sx2,sy2,xx2,'cubic'),'color',fcol);
sy2=-sy2;
plot(xx2,interp1(sx2,sy2,xx2,'cubic'),'color',fcol);
end
[sx,si] = sort(x);
sy = y(si);
xx = sx(1):0.02:sx(end);
plot(xx,interp1(sx,sy,xx,'cubic'),'color',hcol);
if Doppelhalo
sy=-sy;
plot(xx,interp1(sx,sy,xx,'cubic'),'color',hcol);
end
for i=1:length(task)
tx(i)=text(-8,5-i,task{i});
end
set(tx(taskno),'color',mcol);
text(-8,6,'1/2');
plot([-7 -7 -7+dfac],[6+dfac 6 6],'-w');
end
xlim([-10.0 10.0]);
ylim([-7.8 7.8]);
set(a,'xtick',[,], 'ytick',[,], 'color',bcol, 'xcolor',bcol, 'ycolor',bcol, 'position',[0 0 1 1]);
set(a,'dataaspectratio',[1 1 1]);
r=rectangle('curvature',[0 0], 'Position',[-0.2 -1 0.4 2], 'facecolor',[1 1 0]);
update = 0;
end
if ledan & ~showhalo
ledan=0;
%putvalue(dio,0);
set(r,'facecolor',[0 0 0]);
pause(0.5);
elseif ~ledan & ~showhalo
ledan=1;

```

```

    %putvalue(dio,1);
    set(r,'facecolor',[1 1 0]);
    pause(0.5);
end
drawnow;
end

%fprintf(logdatei,'Blue Arc Koordinaten: \nPunkt 1 = (%2.3f,%2.3f)\nPunkt 2 =
(%2.3f,%2.3f)\nPunkt 3 = (%2.3f,%2.3f)\nPunkt 4 =
(%2.3f,%2.3f)\n',x(1),y(1),x(2),y(2),x(3),y(3),x(4),y(4));
fprintf(logdatei,'Ende: %s',datestr(now));
set(f,'keypressfcn','');
delete(f);
%putvalue(dio,0);
fclose(logdatei);

```

```
function bluearcchange(dx,dy)
```

```

%Benötigt Bluearc und Bluearckeypress.
%Menüführung

```

```

global x;
global y;
global dfac;
global task;
global taskno;
global Doppelhalo;

```

```

switch task{taskno}
case 'Schieben'
    x = x + dx*dfac;
    y = y + dy*dfac;
case 'Dehnen'
    fac = 1 + 2*dfac;
    if dx
        if (dx>0) == (x(2)>x(1))
            x = x * fac;
        else
            x = x / fac;
        end
    end
    if dy
        if (dy>0) == (y(2)>y(1))
            y = y * fac;
        else
            y = y / fac;
        end
    end
end
end

```

```

case 'P1'
    x(1) = x(1) + dx*dfac;
    y(1) = y(1) + dy*dfac;
case 'P2'
    x(2) = x(2) + dx*dfac;
    y(2) = y(2) + dy*dfac;
case 'P3Y'
    y(3) = y(3) + dy*dfac;
case 'P4'
    x(4) = x(4) + dx*dfac;
    y(4) = y(4) + dy*dfac;
case 'Spiegeln'
    if dx; x=-x; end
    if dy; y=-y; end
case 'Doppelt'
    if Doppelhalo
        Doppelhalo=0;
    else
        Doppelhalo=1;
    end
end
end

```

```
function bluearckeypress
```

```

% Benötigt auch Bluearc und Bluearcchange
% Reagiert auf die Tasteneingaben

```

```

global x;
global y;
global dfac;
global animate;
global update;
global showhalo;
global task;
global taskno;
global Doppelhalo;
global durchgang;
global xled;
global yled;
global logdatei;

```

```

ch = get(gcf,'currentcharacter');
fprintf('%d\n',ch);

```

```

if ch == 32 % space
    showhalo = ~showhalo;
    update = 1;
end

if ~showhalo; return; end

switch ch
case 28 % left
    bluearcchange(-1,0);
    update = 1;
case 29 % right
    bluearcchange(1,0);
    update = 1;
case 30 % up
    bluearcchange(0,1);
    update = 1;
case 31 % down
    bluearcchange(0,-1);
    update = 1;
case 'q'
    taskno = taskno - 1;
    if taskno < 1; taskno = length(task); end
    update = 1;
case 'a'
    taskno = taskno + 1;
    if taskno > length(task); taskno = 1; end
    update = 1;
case '1'
    dfac = dfac / 2;
    update = 1;
case '2'
    dfac = dfac * 2;
    update = 1;
case 13 % return
    if Doppelhalo
        Position=3;
    elseif y(2) > y(1)
        Position=0;
    else
        Position=1;
    end

fprintf(logdatei, '%d\t% 1.3f\t% 1.3f\t% 1.3f\t% 1.3f\t% 1.3f\t% 1.3f\t% 1.3f\t% 1.3f\t% d\n', durchg
ang,x(1),y(1),x(2),y(2),x(3),y(3),x(4),y(4),Position);
    if durchgang >= 14
        animate = 0;
        return;
    else
        durchgang=durchgang+1;
        update = 1;
        showhalo = 1;

```

```
dfac = 0.1;
Doppelhalo=0;
if durchgang > 4
    xled=0.7;
    yled=0;
end
x = [0.3 1.8 3.55 5.3];
y = [1.0 2.0 1.6 1.0];
end
end
```

## MATLAB – Programme für die Erhebung des blinden Flecks

```

function blindspot

%Programm zur Erhebung der groben Position des blinden Flecks
%Fixationspunkt mit dem rechten Auge bei geschlossenem linken
%Auge fixieren, dann den beweglichen Punkt so weit nach rechts
%verschieben, bis dieser verschwindet. 5 mal für die nasale
%Seite des blinden Flecks, 5 mal für die temporale. Enter
%beendet den Durchgang und speichert den Punkt.
%Benötigt auch Blindspotpress.

global x;
global y;
global abgleich;
global inkrement;
global update;
global durchgang;
global logdatei;

x=3;
y=2;
abgleich=1;
inkrement=0.1;
update=1;
durchgang=1;

code=inputdlg('Versuchspersonencode eingeben:');
code=char(code);

pos = get(0,'screensize');
pos(4)=pos(4)-16;
f = figure('paperpositionmode','manual','menubar','none','color','k','position',pos);
set(f,'keypressfcn','blindspotpress');
a = axes;
set(a,'xtick',[],'ytick',[],'color','k','xcolor','k','ycolor','k','position',[0 0 1 1]);

logdatei=fopen(sprintf('%s.log',code),'at');
fprintf(logdatei,'Start: %s\n',datestr(now));
fprintf(logdatei,'Blind-Spot Koordinaten, Zeile 1-5:links/nasal, Zeile 6-10:rechts/temporal');

while abgleich
    if update
        hold off;
        set(gcf,'color','k');
        plot(x,y,','color',[0.8 0.8 0.8],'markerfacecolor',[0.8 0.8 0.8]);
        hold on;
        plot(0.7,0,','color','w');
    end
end

```

```

    xlim([-5.0 15.0]);
    ylim([-7.8 7.8]);
    set(a,'xtick',[],'ytick',[],'color','k','xcolor','k','ycolor','k','position',[0 0 1 1]);
    set(a,'dataaspectratio',[1 1 1]);
    update=0;
end
drawnow;
end

fprintf(logdatei,'\nEnde: %s',datestr(now));
set(f,'keypressfcn','');
delete(f);
fclose(logdatei);

```

```
function blindspotpress
```

```
%Benötigt auch Blindspot.
%Reagiert auf die Tasteneingaben.
```

```

global x;
global y;
global abgleich;
global inkrement;
global update;
global durchgang;
global logdatei;

ch=get(gcf,'currentcharacter');
fprintf('%d\n',ch);

switch ch
case 28 %left
    if (x-inkrement) >= 0
        x=x-inkrement;
        update=1;
    end
case 29 %right
    if (x+inkrement) <= 15.0
        x=x+inkrement;
        update=1;
    end
case 30 % up
    if (y+inkrement) <= 7
        y=y+inkrement;
        update=1;
    end
end

```

```
case 31 %down
    if (y-inkrement) >= -7
        y=y-inkrement;
        update=1;
    end
case 43 %+
    if inkrement <= 0.8
        inkrement=inkrement*2;
    end
case 45 %-
    if inkrement >= 0.05
        inkrement=inkrement/2;
    end
case 13 %return
    if durchgang >= 10
        fprintf(logdatei,'\n% 1.3f\t% 1.3f',x,y);
        abgleich=0;
    else
        fprintf(logdatei,'\n% 1.3f\t% 1.3f',x,y);
        x=3;
        y=y-1;
        if y < -2.6
            y=2;
        end
        durchgang=durchgang+1;
        update=1;
    end
end
```