

Aus der Augenklinik der Universität Würzburg
Direktor: Prof. Dr. med. F. Grehn

**Einfluss des optischen Akkommodationsreizes
auf akkommodative Änderungen von Distanzen
im okularen Vorderabschnitt**

Inaugural-Dissertation

zur Erlangung der Doktorwürde der
Medizinischen Fakultät
der

Bayerischen Julius-Maximilians-Universität zu Würzburg

vorgelegt von

Ines Günther

aus Heidenheim an der Brenz

Würzburg, November 2008

Referent: Priv.-Doz. Dr. Wolfgang Haigis

Koreferent: Prof. Dr. Erhard Wischmeyer

Dekan: Prof. Dr. Matthias Frosch

Tag der mündlichen Prüfung :

Die Promovendin ist Zahnärztin

**In Liebe
meinen Eltern
und
meinem Bruder
gewidmet**

Inhaltsverzeichnis

		Seite
1	EINLEITUNG UND FRAGESTELUNG	1
2	GRUNDLAGEN	4
2.1	Anatomische Grundlagen	4
2.1.1	anatomischer Aufbau des Auges	4
2.1.2	Corpus ciliare	5
2.1.3	Augenkammer	7
2.1.4	Iris	7
2.1.5	Sklera und Cornea	9
2.1.6	Linse	9
2.1.7	Retina	10
2.1.8	Sehbahn	12
2.2	Akkommodation	14
2.2.1	Akkommodationsreiz	16
2.2.2	Akkommodationstheorien	17
2.2.2.1	Akkommodationstheorie nach von Helmholtz	17
2.2.2.2	Akkommodationstheorie nach Gullstrand	19
2.2.2.2.1	Extrakapsulärer Akkommodationsmechanismus	19
2.2.2.2.2	Intrakapsulärer Akkommodationsmechanismus	21
2.3	Refraktion	22
2.4	Optische Biometrie	23
3	MATERIAL UND METHODIK	24
3.1	Probanden	24
3.2	Voruntersuchungen	25

3.2.1	Autorefraktometer	25
3.2.2	ACMaster	26
3.3	Hauptuntersuchung	29
4	ERGEBNISSE	32
4.1	Ergebnisse der Voruntersuchung	32
4.2	Ergebnisse der Hauptuntersuchung	32
4.2.1	Summenauswertung	34
4.2.2	Vergleich der Standardabweichung der Absolutwerte	49
4.2.3	Standardabweichung der Absolutwerte für das favorisierte Symbol im Vergleich zur Standardabweichung für das Symbol B	53
4.2.4	Symbol L: Verlauf der 30 Einzelmessungen	62
4.2.5	Zeitverlauf der Einzelmessungen für alle Symbole	67
4.2.6	Reproduzierbarkeit	73
5	DISKUSSION	79
5.1	Summenauswertung	81
5.2	Vergleich der Standardabweichung der Absolutwerte	83
5.3	Standardabweichung der Absolutwerte für das favorisierte Symbol im Vergleich zur Standardabweichung für das Symbol B	84
5.4	Symbol L: Verlauf der 30 Einzelmessungen	85
5.5	Zeitverlauf der Einzelmessungen für alle Symbole	86
5.6	Reproduzierbarkeit	87

6	ZUSAMMENFASSUNG	90
7	LITERATURVERZEICHNIS	92

Abkürzungsverzeichnis

d = Dioptrie

IOL = Intraokularlinsen

LIB = Laserinterferenzbiometrie

SEQ = sphärisches Äquivalent

ACS = anterior corneal surface (Hornhautvorderfläche)

PCS = posterior corneal surface (Hornhauthinterfläche)

ALS = anterior lens surface (Linsenvorderfläche)

PLS = posterior lens surface (Linsenrückfläche)

WzW = Weiß-zu-weiß

VK = Vorderkammertiefe

HD = Hornhautdicke

LD = Linsendicke

SD = Standardabweichung

MW = Mittelwert

UG = Untergrenze

OG = Obergrenze

KI = Konfidenzintervall

1 Einleitung und Fragestellung

Akkommodation tritt ein, wenn ein Akkommodationsreiz vorliegt; z.B., wenn der Retina ein Bild außerhalb des Fokus gegeben wird. In den meisten wissenschaftlichen Arbeiten wird als Stimulus für die Akkommodation die „Unschärfe“ verwendet (Campbell 1954 & Fincham 1951), die dazu führt, dass die Sehachsen konvergieren, die Augen akkommodieren und die Pupillen sich kontrahieren.

Es ist allgemein bekannt, dass bei subjektiven Messungen zur Akkommodation eine vor das Auge gesetzte gering negative Linse bei jungen (rechtsichtigen) Probanden den Akkommodationsreiz bildet, so dass hinter der Linse gelegene Objekte wieder scharf gesehen werden können. Diese Akkommodation entspricht dem Betrag der vorgeschalteten Linse. Wird die Linse entfernt, kann der Gegenstand wieder scharf gesehen werden. Somit lässt die Akkommodation nach und das Auge relaxiert (Fincham 1951).

Campbell beschäftigte sich 1954 mit dem Akkommodationsreiz und konnte einige grundlegende Fragen klären:

1. Welcher Rezeptor in der Retina entdeckt den Akkommodationsreiz?

Die Ergebnisse aus seinen detaillierten Versuchen zeigen, dass der Rezeptor, der den Akkommodationsreiz erkennt, die Zapfen der Fovea sind.

2. Was passiert mit dem Akkommodationsmechanismus bei Mangel eines Reizes?

Der Akkommodationsreflex kann unterdrückt werden, indem der Proband in einen abgedunkelten Raum gesetzt wird, er kann aber auch verstärkt werden, indem der Proband durch ein helles Licht den Eindruck bekommt, wie auf einen Horizont zu blicken.

3. Wie akkurat ist die Anpassung, wenn der Reflex initiiert wird?

Je detaillierter die visuelle Aufgabe ist, desto genauer akkommodiert das Auge.

4. Welcher Reiz initiiert den Akkommodationsreflex?

Wird der Retina ein Bild außerhalb des Fokus gegeben, werden die Zapfen der Fovea stimuliert.

Die Untersuchungen ließen die Schlussfolgerung zu, dass die Akkommodation das Optimum eher erreicht, je größer die Anforderung an das Auge ist (Campbell 1954).

Von großer Bedeutung sind der Akkommodationsmechanismus und die erworbenen Daten hierzu für die Weiterentwicklung der so genannten akkommodativen Intraokularlinsen (IOLs), die nach Kataraktoperationen eingesetzt werden. Pro Jahr werden in Deutschland ca. 800.000 Operationen durchgeführt (Wenzel 2007), denn 99% der Deutschen über 65 Jahre leiden am Grauen Star (Döring-Coen 2004). Es ist zu erwarten, dass die Zahl der Operationen und die Kataraktchirurgie in den kommenden Jahren aufgrund der demographischen Entwicklung noch weiter zunehmen werden. Neben einer Verbesserung der Operationstechniken wurden auch die Materialien im Laufe der Zeit verbessert. So werden mittlerweile flexible, faltbare oder rollbare Intraokularlinsen entwickelt. Die Anforderungen an die IOLs sind für alle Materialien gleich: chemische Inertheit, Biokompatibilität, physikalische Stabilität und Widerstandsfähigkeit gegen physikalische Einflüsse.

Die Materialien der z.Z. erhältlichen IOLs lassen sich in zwei Gruppen unterteilen:

1. thermoplastische Kunststoffe (PMMA, Hydrogel, flexible Acrylate)
2. Elastomere (Silikone)

PMMA-Linsen erfordern bei einem Durchmesser von 5mm eine Schnittgröße von 4,5mm. Die Schnittgröße beeinflusst Astigmatismus, postoperativen Visusanstieg und die Wundheilung. Hydrogel-Linsen benötigen beim Einbringen spezielle Falteinstrumente, die den Nachteil besitzen, Abdrücke auf der Linse zu hinterlassen. Die flexiblen Acrylat-Linsen sind schwerer faltbar und gingen deshalb anfangs häufig zu Bruch. Silikonintraokularlinsen weisen eine gute Biokompatibilität vor. Sie zeigen ähnliche Erfolge wie die PMMA-Linsen, haben jedoch aufgrund der Anlagerung von Silikonöl an der Linsenrückfläche bei chirurgisch therapierbaren Netzhauterkrankungen ihren Nachteil.

Heutzutage werden IOLs mit mikroinvasiver Chirurgie/MICS (= micro incision cataract surgery) eingesetzt, so dass wenige Millimeter Schnittgröße ausreichen. Mencucci et al. (2006) und Alio et al. (2005) fanden heraus, dass keine signifikanten Unterschiede bezüglich Anpassungsfähigkeit und Heilung der Cornea zwischen herkömmlicher Chirurgie und MICS bestehen.

Eine perfekte akkommodative Intraokularlinse könnte nicht nur bei der Therapie des Grauen Star erfolgreich eingesetzt werden, sondern auch bei der chirurgischen Therapie der Presbyopie.

Ziel dieser Arbeit ist es, einen optischen Reiz für das Auge zu finden, der Maximalwerte für die Akkommodation erlaubt, sowie Messwertschwankungen bei Messungen im okularen Vorderabschnitt unter Akkommodation minimiert.

Die Messungen im Rahmen dieser Arbeit wurden am ACMaster der Firma Carl-Zeiss Meditec durchgeführt. Damit können exakte Angaben zur Position der Linse während der Akkommodation gemacht werden. Hauptparameter sind hier die akkommodativen Änderungen der Positionen des vorderen und hinteren Linsenpols, woraus die Vorderkammertiefe und die Linsendicke mit zugehörigen Standardabweichungen gemessen werden konnten. Diese Größen wurden bei unterschiedlichen Reizen miteinander verglichen.

2 Grundlagen

2.1 Anatomische Grundlagen

2.1.1 anatomischer Aufbau des Auges

In den folgenden Abschnitten werden die für die Akkommodation und deren Stimulation wichtigen anatomischen Strukturen und physiologischen Mechanismen erörtert. Abb. 1 zeigt eine Übersicht.

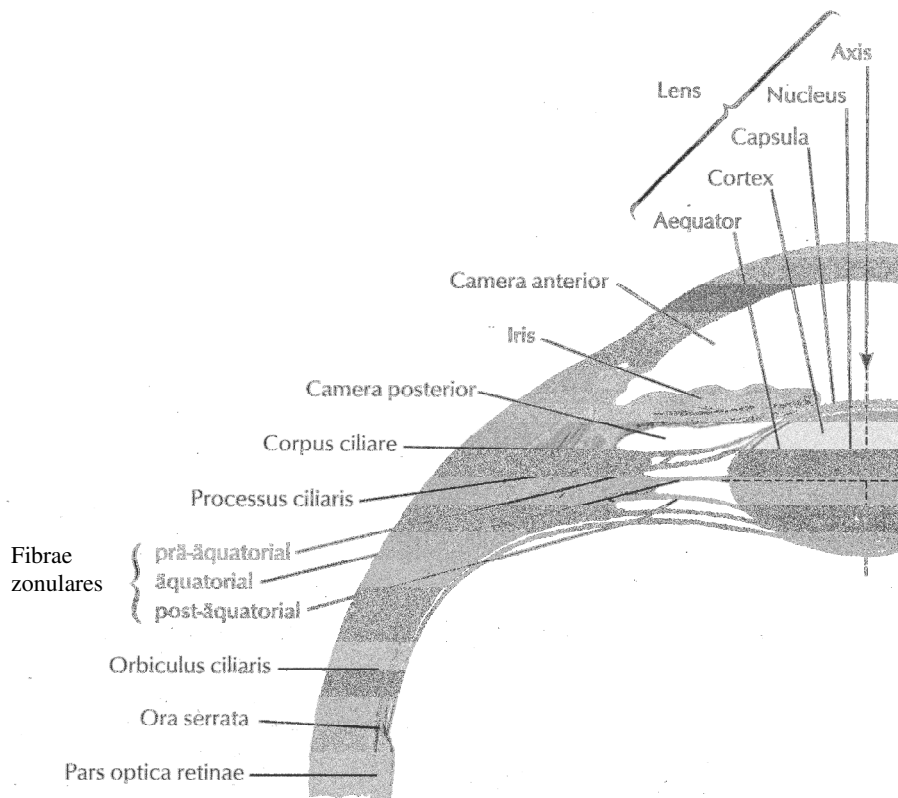


Abb. 1: Horizontalschnitt aus der vorderen Bulbushälfte (aus: Netter 1999).

2.1.2 Corpus ciliare

An der Ora serrata (vgl. Abb. 1) geht die Aderhaut in das Corpus ciliare (Strahlenkörper) über, das mit Pigmentepithel und der nicht mehr lichtempfindlichen Pars ciliaris retinae überzogen ist. Oberflächlich liegt die Basallamina auf. Das Pigmentepithel ist zweischichtig und hochprismatisch, wobei sich die beiden Zellschichten an ihrer apikalen Seite berühren. Lediglich die dem Stroma zugewandte Epithelseite ist pigmentiert, die oberste Schicht ist unpigmentiert und entspricht der Sinneszellenschicht der Retina. Auf Querschnitten durch das Auge scheint der Ziliarkörper dreieckig. Man unterscheidet die Pars plana von der Pars plicata. In der vorderen Hälfte liegt die Pars plicata. Dort wirft der Ziliarkörper 70-80 meridional gestellte leistenartige ca. 1mm hohe Erhebungen auf. Diese Erhebungen sind aus feinstfaserigem Bindegewebe aufgebaut, enthalten viele Kapillaren und fallen gegen die Iris steil ab. In dieser Zone wird hauptsächlich das Kammerwasser ausgeschieden. Die Oberfläche der hinteren Hälfte des Strahlenkörpers wird als Pars plana bezeichnet. Sie erhält durch feine radiäre Fältchen ein streifiges Aussehen. Hier sind die Fibrae zonulares (Aufhängefasern der Linse) am Epithel der Pars ciliaris retinae fixiert.

Im Corpus ciliare liegt der Musculus ciliaris, dessen glatte Muskelzellen in verschiedenen Richtungen angeordnet sind. Sein Ursprung befindet sich am Skleralsporn, von wo aus die Fasern an verschiedenen Stellen in den Corpus ciliare einstrahlen.

Die meridionalen Muskelzellen entspringen im Bereich des Kammerwinkels. Sie inserieren an den zwischen Pigmentepithel und Lamina choroidocapillaris gelegenen elastischen Fasernetzen des Basalkomplexes der Aderhaut. Durch einen Zug dieser Region nach anterior, werden die dort entspringenden Fibrae zonulares entspannt. Von den meridionalen Faserzügen zweigen die radiären Muskelzellen nach innen ab. Die ringförmig verlaufenden Muskelzellen (Fibrae circulares) können vor allem die anterioren Linsen-Aufhängefasern entspannen (Bucher, Wartenberg 1997 & Baumhoer, Steinbrück, Götz 2000).

Im Sagittalschnitt können drei Abschnitte unterschieden werden: ein äußerer longitudinaler Anteil (Brücke'scher Muskel), ein vorne innen gelegener Anteil (Müller'scher Muskel) und ein verbindender Anteil (Iwanoff'scher Muskel), wobei

morphologisch und funktionell keine Trennung vorgenommen werden kann. Die regelmäßige Gitterwindung ist im longitudinalen Teil sehr spitz, im zirkulären stumpf und im retikulären Anteil nahezu 90°. Bei einer Kontraktion nimmt die Zahl der zirkulären Fasern zu, die der longitudinalen und retikulären dementsprechend ab, wodurch eine Anteriorbewegung erfolgt (Rohen 1977).

Innervation des M.ciliaris

Der Musculus ciliaris wird sowohl vom Parasympathikus (N. oculomotorius über das Ganglion ciliare), der eine Kontraktion hervorruft, innerviert, als auch vom Halssympathikus, der für eine Erschlaffung sorgt. Die Nn. ciliares durchbrechen mit den Arterien in der Nähe des Sehnerveneintritts die Sklera. Sie verlaufen dann zwischen Sklera und Choroidea nach anterior und geben an diese beiden Häute Fasern ab. Im Corpus ciliare bilden sie den Plexus ciliaris, der auch Ganglienzellen enthält, von wo aus die Innervation des Strahlenkörpers, der Iris und der Cornea erfolgt (Bucher, Wartenberg 1997).

Die Afferenzen erreichen die Area 17 über die Sehbahn und werden von dort in die Area 19 weitergeleitet. Die Verbindung von Area 19 zum Ncl. Edinger-Westphal ist nicht bekannt. Sie müssen jedoch außerhalb der Colliculi superiores das Mittelhirn erreichen. Der zirkuläre Teil des M.ciliaris (Müller'scher Muskel) wird parasympathisch innerviert, der longitudinale Teil (Brücke'scher Muskel) erhält sympathische Nervenfasern. Sie bewirken eine Anspannung der Zonulafasern während der akkommodativen Ferneinstellung (Alexandridis 1995).

Zonulafasern

Die Zonulafasern verlaufen im Spaltraum zwischen Corpus ciliare und dem Glaskörper von der Ora serrata bis zur Linsenkapsel. Sie entspringen von der Membrana limitans interna des Corpus ciliare. Durch zirkuläre Faserzüge werden die radiär verlaufenden miteinander verbunden und fixiert. Die Mikrofibrillen lagern sich zu dickeren Fibrillen

und schließlich zu Fasern zusammen, die durch Mukoproteine zusammengehalten werden. Die Zonulafasern erreichen einen Durchmesser von 1-40µm. Die Haltefasern ziehen zur Linsenvorder- und hinterfläche. Neben den Haltefasern existieren die Zugfasern, die der Pars plicata des Ziliarkörpers entspringen. Diese beiden Fasern vereinigen sich und sorgen für die Veränderung der Linse (Rohen 1977).

2.1.3 Augenkammer

Die Iris bildet die Grenze zwischen vorderer Augenkammer und hinterer Augenkammer. Die Vorderkammer reicht von der Hinterfläche der Cornea bis zur Vorderfläche der Linse, die Hinterkammer liegt zwischen Iris und Linse. Die Vorderkammer hat eine durchschnittliche Tiefe von 3,0-3,6 mm und ein Volumen von 0,25cm³ (Lutz 1997).

Das von den Ziliarfortsätzen produzierte Kammerwasser ist eine eiweißarme (0,02-0,03%), zellfreie, wasserklare Flüssigkeit, die langsam von der hinteren in die vordere Augenkammer strömt. Von dem Gleichgewicht zwischen Kammerwasserbildung und – abfluss hängt der intraokulare Druck ab.

Als Kammerwinkel wird die Stelle bezeichnet, wo die Vorderfläche der Iris mit der Sklera unmittelbar vor deren Übergang in die Cornea zusammentrifft. An dieser Stelle befindet sich das nur gering ausgebildete Trabeculum reticulare zum Abfluss des Kammerwassers (Bucher, Wartenberg 1997).

2.1.4 Iris

Die Iris liegt vor dem Ziliarkörper und bedeckt größtenteils die Vorderfläche der Linse. Sie ist optisch undurchlässig, ca. 0,5mm dick und kann mit der Blende eines Fotoapparates verglichen werden. Im Zentrum liegt die Pupille, eine kreisrunde Öffnung, deren Durchmesser durch die glatten Irismuskeln reguliert werden kann (Pupillenreflex).

Der stark gegliederten Oberfläche der Irisvorderseite fehlt ein geschlossenes Epithel, wobei aber die an das Kammerwasser grenzenden Bindegewebszellen endothelartig ausgebreitet sind. Das Irisstroma ist aus lockerem zartem Bindegewebe aufgebaut und enthält Fibrozyten, Pigmentzellen und freie Zellen, vor allem Mastzellen. Die breitere mittlere Schicht ist gefäßreich. Hier verlaufen radiär angeordnet die Arterien und Venen, die das Oberflächenrelief der Iris mit bedingen. Die mit Pigmentepithel ausgekleidete Hinterfläche der Iris stellt die vordere Begrenzung der hinteren Augenkammer dar.

Die Iris enthält zwei Muskelzüge, die sowohl radiär (M.dilatator pupillae), als auch zirkulär (M.sphincter pupillae) angeordnet sind. Der M.dilatator pupillae wird von sympathischen Nervenfasern innerviert und sorgt für eine Mydriasis, wohingegen der M.sphincter pupillae parasymphatisch innerviert wird und für eine Miosis sorgt (Bucher, Wartenberg 1997 & Baumhoer, Steinbrück, Götz 2000).

Der Sphincter ist ein 0,5mm breites Band und weist eine Dicke von 40-80 μm auf. Der 2 μm große M.dilatator pupillae ist auf die ganze Iris ausgedehnt und liegt direkt hinter dem lichtundurchlässigen Pigmentepithel der Iris (Alexandridis 1995).

Der Lichtreflex führt dazu, dass sich die Pupille bei stärkerem Lichteinfall verengt und bei schwächerem erweitert. Der physiologische Sinn dieses Reflexes ist der Versuch, den Lichteinfall möglichst konstant zu halten und die Retina gleichmäßig zu beleuchten. Der wahrgenommene Lichtreiz wird über den N.opticus weitergeleitet, wobei die Weiterleitung gleich bis in die Regio pretectalis (Area pretectalis) des Mittelhirns erfolgt. Dort werden die Impulse verschaltet und doppelseitig zum Ncl.accessorius n. oculomotorii weitergegeben. Diese Kerne führen mit ihren efferenten parasymphatischen Fasern über den N.oculomotorius zu einer Pupillenkonstriktion. Die doppelseitige Ansteuerung der prätektalen Kerne der einen Seite zu den parasymphatischen Okulomotoriuskernen beider Seiten führt zum „indirekten Lichtreflex“: Bei isolierter Beleuchtung des einen Auges verengt sich auch die Pupille des anderen (Trepel 1999).

Während der Akkommodation findet eine ebensolche Verengung der Pupille statt. Diese Verengung wird als Synkinese der Pupille bezeichnet (Alexandridis 1995).

2.1.5 Sklera und Cornea

Die als Tunica fibrosa bulbi zusammengefasste Sklera und Cornea stabilisieren den Bulbus, um dem Augendruck und dem Zug der äußeren Augenmuskeln entgegen zu wirken.

Die bis zum Limbus corneae reichende ca. 0,5mm breite Sklera ist gefäßarm, undurchsichtig und aus straffem kollagenem Bindegewebe aufgebaut. Sie ist für die Wachstumsregulierung des Augapfels und für den Augendurchmesser verantwortlich.

Die Cornea bedeckt ungefähr das vordere Sechstel des Bulbus. Sie ist uhrglasförmig und bradytroph, ihre Dickenangabe schwankt zwischen 0,482 und 0,531mm im Zentrum (Straub, Kroll, Kühle 1995) und nimmt gegen den Sulcus sklerae bis auf 1mm zu. Der vertikale Meridian der Cornea ist am stärksten gekrümmt, der horizontale am wenigsten. Die Ernährung der gefäßfreien Cornea erfolgt -ausgehend vom arteriellen Randschlingennetz- durch Diffusion, sowie auch durch die Tränenflüssigkeit und das Kammerwasser.

Das vordere Hornhautepithel ist aus 5-6 lagigem unverhorntem Plattenepithel - mit einer elektronenmikroskopisch nachweisbaren Basalmembran - aufgebaut und grenzt die Cornea nach außen ab. Unter dem Plattenepithel liegt die etwa 10µm dicke Bowman'sche Membran, die aus feinen Kollagenfibrillen aufgebaut ist und die die bindegewebige Substantia propria abtrennt, deren Bindegewebe ca. 9/10 der Cornea ausmacht (= Hornhautstroma). Dieses Bindegewebe besteht aus abgeplatteten Zellen, kreuzweise übereinander geschichteten Lamellen und vielen Kollagenfibrillen. Unter dem einschichtigen Plattenepithel der Hornhauthinterseite (= Hornhautendothel) liegt die dünnere Descemet'sche Membran. Diese besteht aus sehr dichtem und gitterartig angeordnetem Fibrillennetzwerk (Bucher, Wartenberg 1997 & Baumhoer, Steinbrück, Götz 2000).

2.1.6 Linse

Die Linse ist in ihrer Form bikonvex, besitzt eine Vorderfläche von 8,4-13,8mm², eine Rückfläche von 4,6-7,5mm² und einen Brechungsindex der vorderen Rinde von 1,387,

der hinteren Rinde von 1,385 und im Kerngebiet von 1,406 (Lutz 1991). Ihre dem Glaskörper anliegende Hinterfläche ist stärker gekrümmt als die Vorderfläche. Die elastische, homogen erscheinende Capsula lentis umgibt die Linse. An ihrer äußersten Schicht sind seitlich die Zonulafasern des Aufhängeapparates fixiert. An der Linsenvorderseite bleibt das einschichtige Linsenepithel bestehen, wodurch eine ständige Erneuerung der Zellen stattfindet und der vordere Linsenteil dadurch im Lauf des Lebens ca. dreimal so dick wird wie der hintere. Die Hauptmasse der Linse besteht aus Fasern, die schalenartig übereinander gelagert sind. Die dicht zusammengepackten älteren Linsenfasern sind kernlos. Die Fasern lagern sich zwiebelschalenartig übereinander. Diese Differenzierung findet im Bereich des Äquators statt. Es lassen sich Embryonalkern, Fetalkern, infantiler und erwachsener Kern unterscheiden (Lang 2004). An der Linsenvorder- und hinterfläche ist bei einem Neugeborenen ein noch dreistrahliges Linsenstern zu finden. Die beiden Linsensterne sind gegeneinander um 60° gedreht. Dort enden die Linsenfasern, wobei sie in der betreffenden Schale des jeweiligen Sterns verlaufen. Beim Erwachsenen erreichen die 2.100-2.300 Fasern eine Länge von 7-10mm. Die Linse hat ihre Größe ungefähr mit dem dritten Lebensjahr erreicht, wobei sich der Linsenkern auf Kosten des Cortex lentis noch vergrößert. Beim Erwachsenen können die beiden Linsensterne 6-10 Haupt- und 12-16 Nebenstrahlen aufweisen. Dadurch entstehen Diskontinuitätszonen, die sich durch größere Unterschiede im Brechungsindex unterscheiden lassen. (Rohen 1977) Die Linse verliert mit zunehmendem Alter ihre Elastizität und trübt ein.

Die gefäß- und nervenfreie Linse wird über Diffusion ernährt (Bucher, Wartenberg 1997).

2.1.7 Retina

Bei der Retina wird eine Pars caeca (einschichtiges prismatisches Epithel) von einer 0,2-0,4mm dicken Sinneszellen enthaltenden Pars optica unterschieden. Eine Verwachsung mit der Unterlage besteht nur an der Sehnervenaaustrittsstelle und an der Ora serrata (Übergang in die Pars caeca). Die äußeren Schichten der Retina werden über

Diffusion ernährt, wohingegen sich in den inneren Schichten kleine Kapillaren befinden, die die dort lokalisierten Zellen ernähren.

Die Retina ist aus mehreren Schichten aufgebaut (vgl. Abb. 2).

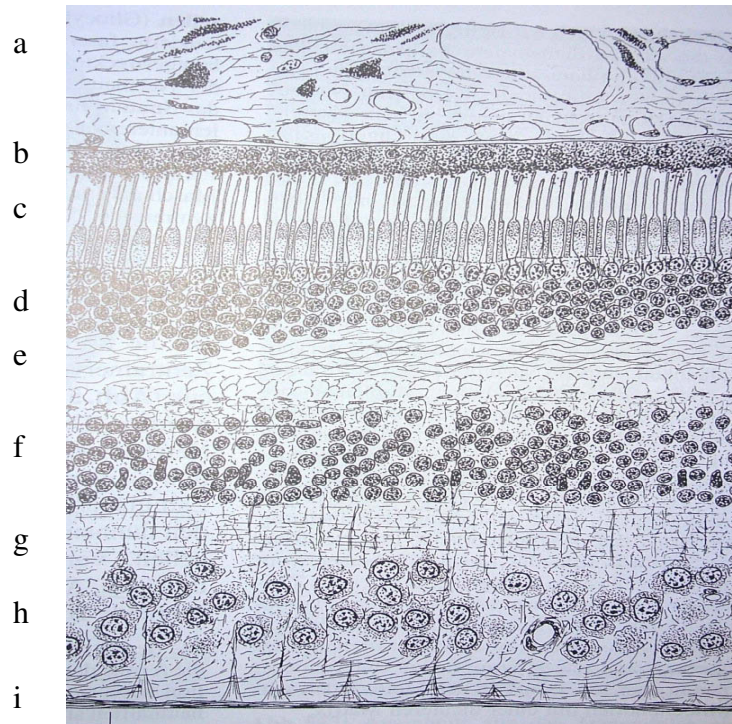


Abb. 2: senkrechter Schnitt durch die Schichten der Retina (360-fache Vergrößerung (aus: Bucher, Wartenberg 1997).

- a) Lamina vasculosa choroidea, b) Pigmentepithel c) Stäbchen und Zapfenschicht
d) Stratum granulosum externum e) äußere plexiforme Schicht f) Stratum granulosum
internum g) innere plexiforme Schicht h) Ganglienzellschicht i) Nervenfaserschicht
mit Stratum limitans internum.

Die Pars optica retinae ist so gegliedert, dass sich die lichtempfindlichen Zellen (Zapfen und Stäbchen) an der äußersten, an das Pigmentepithel grenzenden Zone befinden. Die Zapfen dienen dem Farbsehen (photopisches Sehen), mit den Stäbchen können Helligkeitsunterschiede (skotopisches Sehen) festgestellt werden.

An der Stelle des Sehnervenaustritts (Discus nervi optici) befinden sich keine Photorezeptoren. In der Fovea centralis sind nur Zapfen lokalisiert, wohingegen in der Peripherie vermehrt Stäbchen vorkommen (vgl. Abb. 2) (Bucher, Wartenberg 1997).

In jedem Auge sind ca. 6 Millionen Zapfen und ca. 110 Millionen Stäbchen zu finden, die auf 1,2 Millionen Ganglienzellen konvergieren. Der Zapfendurchmesser beträgt etwa $2\mu\text{m}$, der Stäbchendurchmesser etwa $3\mu\text{m}$.

Im Außenglied der Stäbchen, das länger ist als das der Zapfen, findet sich beim dunkeladaptierten Auge Rhodopsin. Bei stärkerer Belichtung wird das Rhodopsin durch eine reversible chemische Reaktion gespalten (Klinke, Silbernagel 2001).

Die Photopigmente der Zapfen sind in der Lage, je ein Wellenlängenband optimal zu empfangen. Die benachbarten Wellenlängen werden umso weniger absorbiert, je weiter sie vom Empfindlichkeitsmaximum abweichen. Die Empfindlichkeitsmaxima liegen bei 415-425nm, 520-540nm und 550-570nm. Auf etwa elf langwellig empfindliche Zapfen kommen neun mittelwellige und nur ein kurzwellig empfindlicher Zapfen (Straub, Kroll, Küchle 1995).

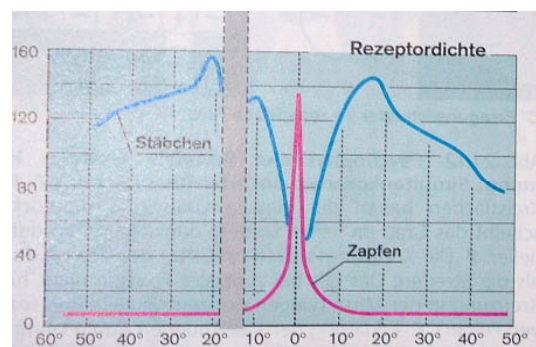


Abb. 3: Verteilung der Stäbchen und Zapfen auf der Retina (aus: Klinke, Silbernagel 2000).

x-Achse: Rezeptordichte von nasal nach temporal

y-Achse: Rezeptordichte (1.000mm^2)

2.1.8 Sehbahn

Das erste Neuron der Sehbahn sind die speziell differenzierten Zapfen und Stäbchen. Sie leiten die Impulse an die bipolaren Nervenzellen weiter, die das zweite Neuron bilden. Die Ganglienzellen, die mit ihren zentralwärts gerichteten Fortsätzen den N. opticus bilden, werden als drittes Neuron bezeichnet. Oberhalb der Hypophyse kreuzen sich die beiden Sehnerven im Chiasma opticum, wo die Nervenfasern der

medialen Seite der Netzhaut zur Gegenseite kreuzen. Der sich anschließende Tractus opticus führt folglich die Fasern der ipsilateralen temporalen und kontralateralen nasalen Seite. Er endet dann im Corpus geniculatum laterale des Thalamus, wo die visuellen Impulse auf das vierte Neuron der Sehbahn umgeschaltet werden.

Vom Thalamus setzt sich die Sehbahn über die Radiatio optica zur Sehrinde fort. In der Area 17 der primären Sehrinde (primärer visueller Kortex) endet die Sehbahn. Afferent ist die Area 17 in erster Linie mit dem Corpus geniculatum laterale verbunden

(vgl. Abb. 4), wobei die Fovea centralis ca. 4/5 der gesamten primären Sehrinde einnimmt. Efferenzen sendet die Area 17 in die sekundäre Sehrinde (Area 18 und 19). Erst dort erfolgt die integrative Verarbeitung des visuell Wahrgenommenen (Trepel 1999).

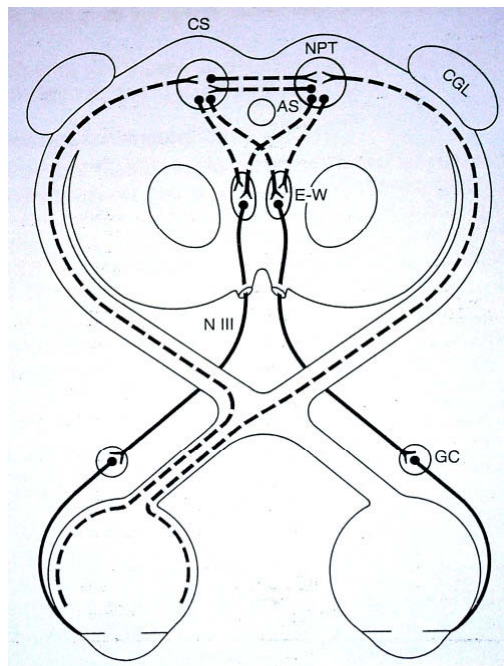


Abb. 4: afferente und parasympathische efferente Bahn der Pupillenlichtreflexe (aus: Alexandridis 1982).

CS: Colliculus superior, NPT: Nucleus pretectalis, CGL: Corpus geniculatum laterale, AS: Aquaeductus sylvii, E-W: Edinger-Westphal Kerne, GC: Ganglion ciliare.

2.2 Akkommodation

Unter Akkommodation (lat. *accommodare* = sich anpassen) versteht man die Fähigkeit des Auges, seine Brechkraft so zu verändern, dass alle zwischen Fernpunkt (*Punctum remotum*) und Nahpunkt (*Punctum proximum*) gelegenen Sehobjekte auf der Netzhaut scharf abgebildet werden können. Sie gleicht einem Reflex, ist aber willensabhängig. Als Nahpunkt wird die kürzeste Entfernung, als Fernpunkt die weiteste Entfernung bezeichnet, in der scharf gesehen werden kann. Sie entsprechen beim Emmetropen (Rechtsichtigen) dem Maximum und Minimum akkommodativer Einstellung (Sachsenweger 1980).

Ein emmetropes Auge vereinigt parallel einfallende Strahlen auf der Netzhaut. Parallele Strahlen kommen (theoretisch) von Gegenständen, die „unendlich entfernt“ liegen, d.h. von Gegenständen, die mindestens 5m entfernt sind. Von näher liegenden Objekten erreichen divergierende Strahlen das Auge, die nur dann auf der Netzhaut fokussiert werden, wenn die Linse die Krümmung ihrer Fläche verändert (Grehn 2005).

Normalerweise befindet sich die Linse durch die Spannung der Kapsel in leicht abgeplattetem Zustand. Der Ziliarmuskel ist entspannt, die Zonulafasern sind dabei angespannt. Lässt die Kapselspannung nach, so versucht die Linse, sich der Kugelform anzunähern. Hauptsächlich nimmt die Krümmung der Vorderfläche zu und somit auch deren Brechkraft. Um die Linsenkrümmung zu bewirken müssen Zonula, Ziliarmuskel und die elastische Membran der Aderhaut funktionell zusammenwirken. Durch die Desakkommodation erfolgt die Rückführung des akkommodierten Zustands in die Ruhelage (Rohen 1977).

Als Akkommodationsbereich wird die Strecke zwischen Fern- und Nahpunkt bezeichnet. Sie wird in Metern angegeben und ist von der Refraktion abhängig. Die statische Refraktion ist die Brechkraft des Auges im akkommodationslosen Zustand, die dynamische Refraktion die Brechkraft des Auges zusammen mit der durch die Akkommodation herbeigeführten Brechkraftzunahme.

Auch die Sehschärfe, Pupillenverengung und Konvergenz (Synkinese der Pupille, Alexandridis 1982), Umfeldleuchtdichte, Farbe des Sehobjektes, sphärische Aberration und Tiefenschärfe des Auges haben einen beträchtlichen Einfluss auf den Akkommodationsbereich (Sachsenweger 1980).

Die Akkommodationsbreite beschreibt den Umfang der durch die Akkommodations-einstellung bewirkten Brechkraftzunahme. Sie wird in d angegeben. Im jugendlichen Alter kann sie bis zu 14d betragen, mit zunehmendem Alter nimmt sie ab und liegt bei einem 40jährigen nur noch bei 6d (vgl. Abb. 5) (Klinke, Silbernagel 2001). Unter den Ursachen sind der Elastizitätsverlust der Aderhaut und des Ziliarmuskels und das Linsenwachstum, welches zeitlebens anhält und zu einer Kernverdickung führt. Schließlich resultiert hieraus die Presbyopie.

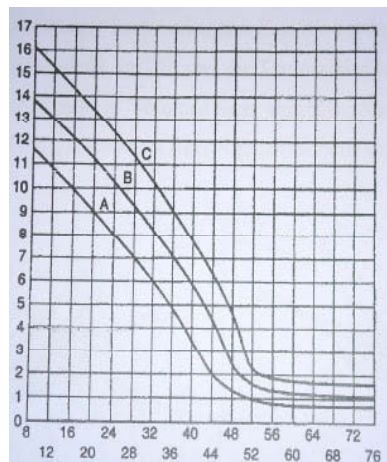


Abb. 5: Durchschnittswerte der Akkommodation in Abhängigkeit vom Alter (Duane 1922).

x-Achse: Alter (Jahre), y-Achse: Akkommodation (Dioptrie).

A= niedrigste Werte, B= Mittelwerte, C= höchste Werte. (aus: Straub, Kroll, Küchle)

Die Dauer der Akkommodationseinstellung beträgt 0,5-1,5sec (Akkommodation von fern auf nah), die Entspannung 0,8-1,3sec. Allerdings kann die Akkommodationszeit durch biologische Einflüsse (z.B.: klimakterische Störungen) und Umwelteinflüsse nicht unerheblich beeinflusst werden (Sachsenweger 1980).

Neben diesen Veränderungen, die die Akkommodation beeinflussen, spielen auch Fluktuationen der Linsenbrechkraft, sog. Mikrofluktuationen eine Rolle.

Mikrofluktuationen wurden bereits von Collins 1937 beobachtet, von Arnulf 1951 und von Campbell 1959 untersucht und von Charman & Heron 1988 zusammengefasst. Untersuchungen von Menozzi 1989 ließen die Annahme zu, dass Mikrofluktuationen Artefakte sind. Es wurden Einflüsse des kardiopulmonalen Systems diskutiert; auch Augenbewegungen können aufgrund der sphärischen Abberation Artefakte erzeugen,

und der Aufbau der Messapparatur kann ebenso eine Rolle spielen (Menozzi, Krueger 1997).

Van der Heijde et al. (1996) führte Ultraschallmessungen durch und unterschieden niederfrequente von hochfrequenten Mikrofluktuationen:

- niederfrequente Mikrofluktuationen in der Vorderkammertiefe und der Linsendicke werden neurologischen Ursprungs angenommen,
- hochfrequente Mikrofluktuationen in der Achsenlänge werden dem Herzschlag zugeordnet.

2.2.1 Akkommodationsreiz

Der Mechanismus, der die Akkommodation in Gang setzt, ist sehr komplex. Nach den Untersuchungen von Fincham (1951) wirkt ein verschwommen wahrgenommener Gegenstand nur dann als Stimulus, wenn sein Brennpunkt hinter der Netzhaut liegt, also eine Hyperopie vorliegt. Bei einer Myopie (Brennpunkt vor der Netzhaut) ist keine Akkommodation auslösbar. Neben Konvergenz und Divergenz des auf die Netzhaut einfallenden Lichtes (Stiles-Crawford-Effekt) wird auch diskutiert, ob nicht auch die chromatische Abberation als Stimulus gelten kann. Ein zusätzlicher Reiz für die Naheinstellung ist die Disparation der korrespondierenden retinalen Bilder. Sie gilt als Information für das Fusionszentrum und als Stimulus zur Konvergenz und Akkommodation. Kommt es zu einer Änderung der Fixationsentfernung, muss die Konvergenz neu eingestellt werden, um das Auftreten einer Diplopie zu vermeiden (Akkommodations-Konvergenz-Synkinese der Pupille) (Alexandridis 1995).

2.2.2 Akkommodationstheorien

2.2.2.1 Akkommodationstheorie nach von Helmholtz

Von Helmholtz beschreibt seine Akkommodationstheorie in seinem 1867 erstmals erschienen „Handbuch der physiologischen Optik“.

Diese Beobachtungen ergeben eine qualitative Beschreibung des Akkommodationsprozesses. Helmholtz beschreibt vier wesentliche Veränderungen, die während der Akkommodation am Auge beobachtet werden können.

Er stellt fest, - dass sich die Pupille während der Nahakkommodation verengt und während der Fernakkommodation erweitert.

- dass sich der Pupillenrand der Iris und die Mitte der vorderen Linsenfläche bei eintretender Nahakkommodation etwas nach vorne verschieben.

- dass sich die Vorderfläche der Linse bei Nahakkommodation stärker wölbt als bei der Fernakkommodation.

- dass sich die Hinterfläche der Linse ebenfalls stärker beim Nahsehen wölbt, aber nur in sehr geringem Maße.

Helmholtz's Beobachtungen lassen die Schlussfolgerung zu, dass sich die Linsenvorderfläche nach anterior bewegt, die Linsenrückfläche an ihrer Stelle bleibt. Somit nimmt die Linse bei der Nahakkommodation an Dicke zu. Da das Volumen der Linse stets konstant bleibt, lässt sich daraus schließen, dass sich der Durchmesser der Äquatorialebene verkürzt.

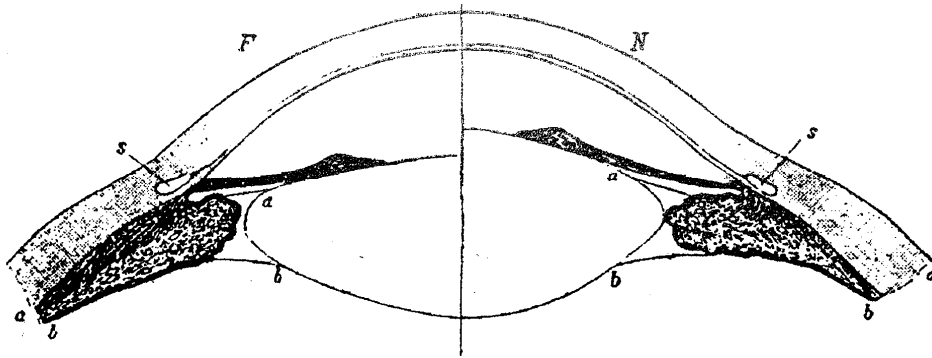


Abb. 6: Querschnitt des menschl. Auges: Fernakkommodation F und Nahakkommodation N (nach Helmholtz) (aus: Helmholtz 1909).

- a) vorderer Rand der Zonulafasern
- b) hinterer Rand der Zonulafasern
- s) Schlemmscher Kanal

Die in der Abb. 6 dargestellte Gestaltänderung der Linse erklärt Helmholtz folgendermaßen:

Im fernakkommodierten Zustand (Ruhezustand) wird die Linse durch die Zonulafasern gespannt und gedehnt. Bei Kontraktion des Ziliarmuskels nähert sich das hintere Ende der Zonula der Linse an und die Spannung der Zonulafasern verringert sich. Durch die ursprüngliche Spannung wird die Linse in ihrem äquatorialen Durchmesser gedehnt, in ihrer Achse verkürzt und somit abgeflacht. Lässt der Zug durch die Kontraktion des Ziliarmuskels nach, wird die Äquatorialfläche der Linse kleiner, die Länge in ihrer Achse dicker und die Wölbung der Flächen größer. Durch den Druck der Iris wird die Wölbung der vorderen Fläche vergrößert, die der hinteren verkleinert. Die Wölbung der Hinterfläche kann der des fernakkommodierten Auges gleichgesetzt werden (Helmholtz 1909).

Durch seine Versuche schließt Helmholtz eine Krümmungsveränderung der Hornhaut aus, ebenso eine Bulbusverlagerung bei der Akkommodation.

2.2.2.2 Akkommodationstheorie nach Gullstrand

In der dritten Auflage des 1909 erschienen „Handbuch der physiologischen Optik“ von H. von Helmholtz war ein Zusatz von A. Gullstrand beigefügt. Dieser Zusatz baut Helmholtz's Akkommodationstheorie aus und beschreibt zwei Akkommodationsmechanismen.

2.2.2.2.1 Extrakapsulärer Akkommodationsmechanismus

Grundlage dieses Akkommodationsmodells ist die Funktion des M.ciliaris und die Anordnung der Zonulafasern. Der Ziliarmuskel beeinflusst die Linsenform mit Hilfe der Zonulafasern (vgl. Abb. 7). Der Ursprung der Zonulafasern erstreckt sich von der Innenfläche des Ziliarkörpers bis hin zur Ora serrata. Die Zonulafasern der Linsenvorderfläche sind relativ weit posterior am Processus ciliaris befestigt, die Zonulafasern der Linsenrückfläche überkreuzen diese und ziehen weiter nach vorne. Aus dieser anatomischen Anordnung der Faserzüge folgt, dass die zur Linsenvorderfläche ziehenden Zonulafaserbündel bei Muskelkontraktion größere Exkursionen in Längsrichtung ausüben, als die übrigen.

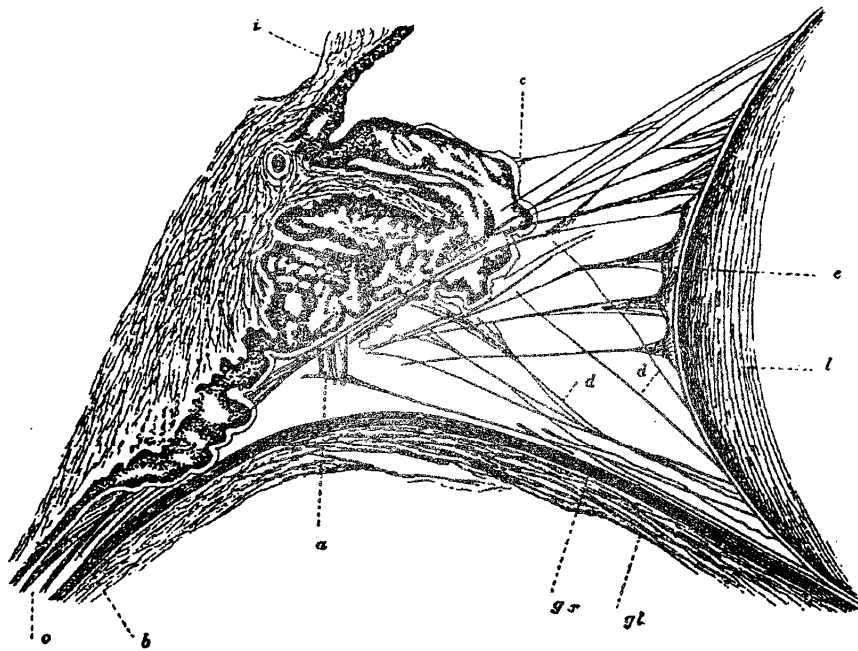


Abb. 7: Darstellung der Zonulafasern und des Ziliarmuskel (nach Retzius) (aus: Gullstrand 1909).

- a) kurze starke Anheftungsfasern der hinteren Zonulabalken
- b) hinten aus der Sklera entspringende Zonulafasern
- c) vorn vom Ziliarfortsatz entspringende Zonulafasern
- d) vom Ziliarfortsatz entspringende Zonulafasern, die die Zonulabalken kreuzen und anhaften
- e) Räume zwischen der Linsenkapsel und der perikapsulären Membran
- gl) Glaskörper gr) vordere Grenzschicht i) Iriswurzel
- l) Linse o) Orbikularraum

Die Kontraktion des Ziliarmuskels sorgt für eine Anterior-Bewegung der weiter hinten liegenden Befestigungsstellen der vorderen Zonulafasern. Dadurch resultiert ein signifikantes Nachlassen der Faserspannung. Die hinteren Zonulafasern werden weit weniger entspannt, d.h., dass die zur Vorderfläche ziehenden Fasern relativ stärker relaxiert werden als die restlichen. Daraus folgt die charakteristische Formveränderung der Linse: die Linsenvorderfläche krümmt sich stärker als die Linsenrückfläche.

2.2.2.2 Intrakapsulärer Akkommodationsmechanismus

Aufgrund der Geschwindigkeit des Akkommodationsvorganges schloss Gullstrand die Möglichkeit aus, dass während der Akkommodation ein Flüssigkeitsstrom durch die Linsenfaser stattfindet. Da die Substanz der Linse keine Elastizität aufweist, ist anzunehmen, dass das Volumen der verschiedenen Linsenfaser während der Akkommodation konstant bleibt. Die Formveränderung kann nur aus einer relativen Änderung der Anordnung der Fasern zueinander resultieren. Da die Fasern an ihren Enden fixiert sind, kann die Änderung nur im zentralen Teil stattfinden. Zu einer Formveränderung der Linse muss eine korrespondierende definierte Verlagerung der Fasern in der Linsensubstanz in Abhängigkeit ihrer Anordnung stattfinden (Abb. 8).

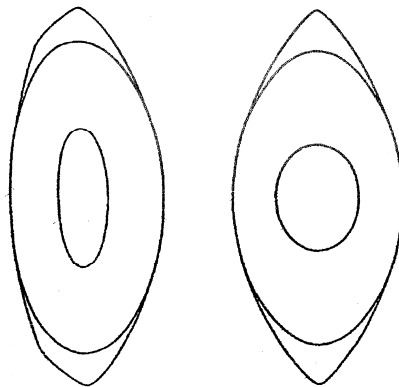


Abb. 8: Schematischer Meridionalschnitt durch die Linse in Ruhestellung (links) und maximaler Akkommodation (rechts) (im Alter von 20 Jahren) (aus: Gullstrand 1911).

Die Abb. 8 zeigt schematisch die Formveränderung der Linse, wie sie sich Gullstrand vorstellte. Die äußerste Linie stellt den Schnitt durch die Linsenoberfläche dar. Die beiden zentralen Linien sind meridionale Schnitte durch Isoindizialflächen (Flächen mit gleichen Brechungsindices). Während der Formveränderung findet keine Kompression im Linsenzentrum statt und das von der Isoindizialfläche begrenzte Volumen bleibt konstant.

Aus der Anatomie lässt sich schlussfolgern, dass bei der Akkommodation die äquatorialen Durchmesser der kleineren Isoindizialflächen mehr verkürzt werden als die größeren. Dies bedeutet eine Zunahme des effektiven Totalindex der Akkommodation.

Lokal kann durch das Eindringen kleinerer einzelner Fasern zwischen andere eine geringe Indexerhöhung entstehen, obwohl die physikalischen Indices der einzelnen Fasern unverändert bleiben. Somit lässt sich erklären, dass die in der Abbildung dargestellte kleinere Isoindizialfläche bei der Akkommodation dem vorderen Linsenpol offensichtlich etwas näher kommt. Das Eindringen von Fasern von zentral sorgt für die Vergrößerung des achsennahen Flächeninhaltes. Diese Veränderungen bezeichnet Gullstrand als „intrakapsulären Akkommodationsmechanismus“ (Gullstrand 1909).

Dieser Akkommodationsmechanismus kommt also durch eine Änderung in der Lage der Isoindizialflächen zustande, in dem Sinne, dass im axialen Bezirk der Linse sich eine dickere Schicht stärker brechender Linsenpartikel einfügt. Die Verschiebung tritt in unterschiedlichem Ausmaß zusammen mit verschiedenen Linsenradien auf.

Neben diesen Akkommodationstheorien gibt es heute weitere, wie z.B. die Akkommodationstheorie nach Schachar, die allerdings nicht anerkannt sind.

2.3 Refraktion

Die Refraktion eines Auges wird definiert als die optische Einstellung für die Fovea zentralis, die sich aus der Gesamtbrechkraft und der Achsenlänge ergibt. Sie ist im Verlauf des Lebens wegen des Augenwachstums nicht konstant. Statistisch gesehen ist die häufigste Refraktion eine geringe Hyperopie.

Refraktometer sind so konstruiert, dass sie eine Testmarke im Fernpunkt des Auges abbilden. Bei Auto-Refraktometern überwacht ein elektronischer Detektor die Scharfeinstellung und steuert die Testmarkeneinstellung. Das Ergebnis wird berechnet und anschließend ausgedruckt. Diese Geräte messen die Gesamtrefraktion eines Auges ohne Berücksichtigung der Akkommodation, daher erfolgt häufig eine Nacheinstellung der Refraktion. Aufgrund der Randfehler des menschlichen Auges sollte in der Pupillenmitte gemessen werden. Die Messpupille dieser Geräte liegt bei etwa 2mm. Durch einen kleinen Monitor am Gerät kann die Größe der Pupille eingesehen werden

und dann durch manuelle Justierung mittels eines Joysticks ggf. korrigiert werden (Axenfeld 1992).

2.4 Optische Biometrie

Die optische Biometrie beruht auf dem Prinzip der Teilkohärenz-Interferometrie (PCI). Das verwendete Infrarotlicht (Wellenlänge von 780nm) kurzer Kohärenzlänge wird von einer Laserdiode ausgestrahlt. Dieses Licht wird in zwei Teilstrahlen unterschiedlicher Weglänge zerlegt und sowohl an der Hornhaut/Linse als auch an der Netzhaut reflektiert.

Interferenz tritt dann auf, wenn die Weglänge zwischen den Teilstrahlen kleiner als die Kohärenzlänge ist. Ein Photodetektor erfasst das Interferenzsignal. Dieses wird von der präzise bestimmbaren Position des Interferometerspiegels aufgezeichnet. Die optische Weglänge zwischen Hornhaut/Linse und Netzhaut ist die Messgröße (Haigis, Lege 2000).

Ein Vorteil der Laserinterferenzbiometrie ist, dass sie unschädlich für das untersuchte Auge ist und somit beliebig oft wiederholt werden kann. Außerdem handelt es sich um ein kontaktloses Messverfahren ohne die Notwendigkeit von Lokalanästhetika.

3 Material und Methodik

In diesem Kapitel werden in chronologischer Reihenfolge die wichtigsten Schritte dieser Arbeit dargestellt.

Neben der Auswahl der Probanden gehören dazu die Vor- und Hauptuntersuchungen und die Beschreibung der Messaufbauten und der Messreihen.

3.1 Probanden

Im Rahmen dieser Arbeit sollten 20 Probanden gemessen werden, die sich freiwillig für Untersuchungen der Akkommodation zur Verfügung stellten.

Auswahlkriterien waren zum einen das Alter, welches zwischen dem 10. und 40. Lebensjahr liegen sollte, dass die Probanden möglichst emmetrop sein sollten und dass bei den Messreihen im Rahmen der zeitgleich durchgeführten Studie „Präzisionsmessungen der Änderungen von Distanzen im okularen Vorderabschnitt in Folge verschiedener Reize“ (Dissertation A. Koch) aussagekräftige Ergebnisse vorhanden waren. Leichte Myopien und Hyperopien wurden bis ca. $\pm 0,75$ d akzeptiert. Die Auswahl der Probanden war nicht leicht, da diese erstens möglichst emmetrop sein sollten und zweitens die in den fünf verschiedenen Messzyklen gestellten, relativ hohen Anforderungen an Konzentration und Sehvermögen erfüllen mussten. Die zeitlichen Anforderungen an die Probanden waren relativ hoch, so dass im Durchschnitt jeweils 1,5 bis 2 Stunden aufgebracht werden mussten.

Aufgrund dieser strengen Auswahlkriterien waren alle Messergebnisse verwertbar.

Von insgesamt 20 Probanden waren zehn männlichen und zehn weiblichen Geschlechts. Das Durchschnittsalter betrug zum Zeitpunkt der Messungen $25,150 \pm 2,455$ Jahre. Der jüngste männliche Proband war 22 Jahre, der älteste 29 Jahre. Die jüngste weibliche Probandin war 23 Jahre, die älteste 32 Jahre.

Pro Auge wurden fünf verschiedene Messzyklen (zu je 30 Einzelmessungen mit fünf verschiedenen optischen Reizen) mit jeweils vier Messreihen (in je vier verschiedenen optischen Entfernungen 0, -1, -3, -5 d) durchgeführt.

3.2 Voruntersuchungen

Die Voruntersuchungen fanden im Rahmen der Arbeit „Präzisionsmessungen der Änderungen von Distanzen im okularen Vorderabschnitt in Folge verschiedener Reize“ statt. Relevant für diese Arbeit waren die Messungen mit dem Autorefraktometer der Firma Canon (Seriennr.: R-50+) und dem ACMaster der Firma Carl Zeiss Meditec (Seriennr.: S/N871366, Model 1233/006).

3.2.1 Autorefraktometer

Die Refraktion wurde an einem Autorefraktometer der Firma Canon bestimmt. Der Proband saß vor dem Gerät und schaute mit einem Auge auf ein stilisiertes Landschaftsbild, wobei das Kinn auf einer individuell einstellbaren Kinnstütze auflag. Die Stirn wurde ebenso an eine individuell einstellbare Stütze angelegt. Der Untersucher konnte auf der dem Probanden gegenüberliegenden Seite angebrachten Bildschirm einen Teil des Auges (Pupille und umgebende Iris) sehen und fokussierte den Mittelpunkt der Pupille unter Scharfstellung der die Pupille umgebenden Strukturen. Pro Auge wurden drei Einzelmessungen durchgeführt. Danach wurde das Ergebnis mit errechnetem Mittelwert ausgedruckt. Man erhielt die Werte für Sphäre (Sph), Zylinder (Cyl) und Achse.

Über die Formel

$$SEQ = Sph + 0,5 \times Cyl$$

wurde das sphärische Äquivalent (SEQ) bestimmt.

3.2.2 ACMaster



Abb. 9: ACMaster.

Mit diesem Gerät (vgl. Abb. 9) war es möglich, mittels Laserinterferenzbiometrie (LIB) die Hornhautdicke, die Länge der vorderen Augenkammer und die Linsendicke zu bestimmen. Außerdem bestand die Möglichkeit, neben diesen Teilstrecken auch die absoluten Positionen dieser Strukturen anzuzeigen. Als Nullwert hierfür galt die Position der Hornhautvorderfläche (ACS= anterior corneal surface). Es wurden dann die weiteren Positionen Hornhauthinterfläche (PCS= posterior corneal surface), Linsenvorderfläche (ALS= anterior lens surface) und Linsenrückfläche (PLS= posterior lens surface) angegeben. Zusätzlich konnte ein geräteinternes Fixationssymbol optisch in verschiedene Entfernungen gebracht werden, wodurch optische Akkommodationsreize am gemessenen Auge zwischen +6 und -5d realisiert werden konnten.

Bei der Anzeige der Werte wurden die optischen Weglängen gewählt, da diese exakter sind als die geometrischen Werte, die man durch Umrechnung mit einem spezifischen Brechungsindex erhält. Die Skalierung der Anzeige erfolgte bis auf drei Stellen nach dem Komma (0,001).

Die Messungen wurden auch hier am sitzenden Probanden durchgeführt. Je nach Bedarf des Probanden konnte das nicht untersuchte Auge mit einer Augenklappe abgedeckt

werden, um die Konzentrationsfähigkeit zu verbessern und störende Faktoren auszuschalten. Der Proband stützte sein Kinn auf einer manuell verstellbaren Kinnstütze auf; die Stirn wurde an ein Stirnband angelehnt. Der Proband sollte so entspannt wie möglich sitzen, um bei den Messungen Bewegungen des Kopfes zu vermeiden. Fand während der Messreihen eine Bewegung des Kopfes statt, veränderte sich die Lage der Linsenreflexe, wodurch diese nicht genau vermessen werden konnten. Der Proband schaute zuerst auf eine rote Leuchtdiode in der Mitte des kreisrunden Blickfeldes. Der Untersucher saß dem Probanden gegenüber und konnte auf dem Bildschirm Pupille, Iris und Sklera sehen. Mit Hilfe eines Kreuzes wurde die Mitte der Pupille eingestellt und so fokussiert, dass sich die Ränder der Iris scharf darstellten. Dann konnte die Bestimmung des Weiß-zu-Weiß Durchmessers (WzW) der Hornhaut erfolgen (Abb. 10), aus der sich die Position der Sehachse ableiten ließ, indem eine geräteinterne Fixationslichtquelle in eine entsprechende Position gesetzt wurde. Pro Auge und Messreihe erfolgten drei Einzelmessungen. Aus diesen drei Messungen wurde ein repräsentativer Wert ausgesucht und die eigentliche Messreihe (Messung der Vorderabschnittsdistanzen) konnte beginnen.

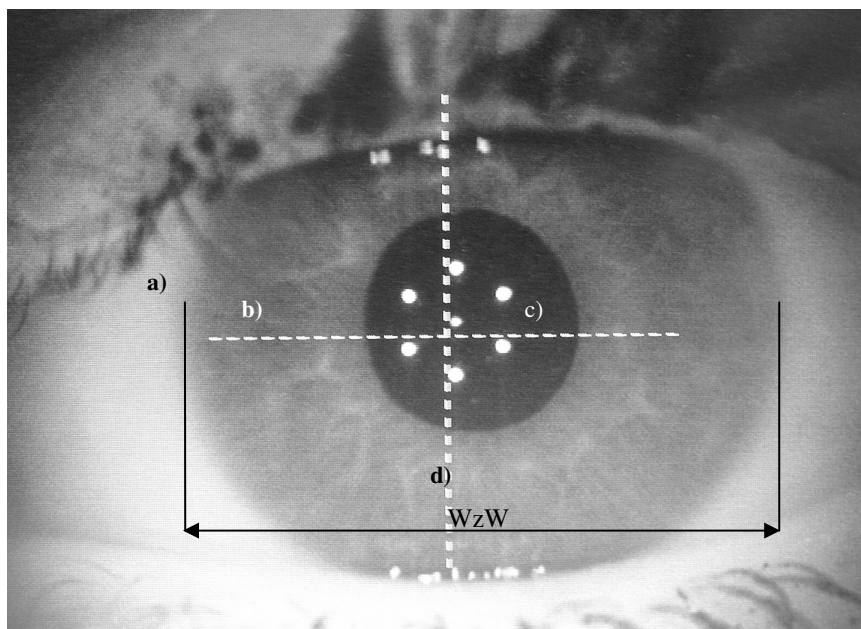


Abb. 10: WzW (a) Sklera, b) Iris, c) Pupille mit Spiegelung der Dioden, d) Messkreuz).

Die Messung der Distanzen ACS, PCS, ALS und PLS fand entlang der optischen Achse statt, um maximale Interferenzen zu erzielen.

Dem Probanden erschien zunächst das Symbol X (vgl. Abb. 12) bei 0d auf schwarzem Grund, welches sich aus mehreren roten, grünen und blauen Pixeln darstellte. Er wurde aufgefordert, das X möglichst entspannt anzuschauen, um einer Gerätemyopie vorzubeugen. Der Untersucher konnte auf seinem Bildschirm einen großen Reflex erkennen, der von der vorderen und hinteren Hornhautkante stammte und einen kleineren Reflex, ausgehend von der vorderen und hinteren Linsenkante. Ziel war es, diese Reflexe zu überlagern und im Zentrum des Messfeldes, welches mittels Fadenkreuzes markiert war, darzustellen. Zuerst wurde der Reflex der Hornhaut mittels Joystick ins Zentrum des Messfeldes gebracht und scharf gestellt. Anschließend wurde der Reflex der Linse mittels Tastatur ebenso in die Mitte des Fadenkreuzes gebracht. Der Proband folgte dem X durch Augenbewegung. Erfolgte eine optimale Überlagerung der beiden Reflexe, wurde die optische Achse senkrecht getroffen und die Reflexe ließen sich maximal darstellen. Die Messung fand folglich in dieser Achse, also außerhalb der Sehachse statt. Zwischen den Messungen wurde der Proband aufgefordert zu zwinkern, um den Tränenfilm nicht abreißen zu lassen, da sonst die Reflexe unscharf wurden und nicht mehr messbar waren. Durch Drücken eines Knopfes am Joystick wurden die Messungen ausgelöst. Dem Untersucher erschien das Messergebnis auf dem Bildschirm entweder als Angabe der Teilstrecken, oder als absolute Position (vgl. Abb. 11).

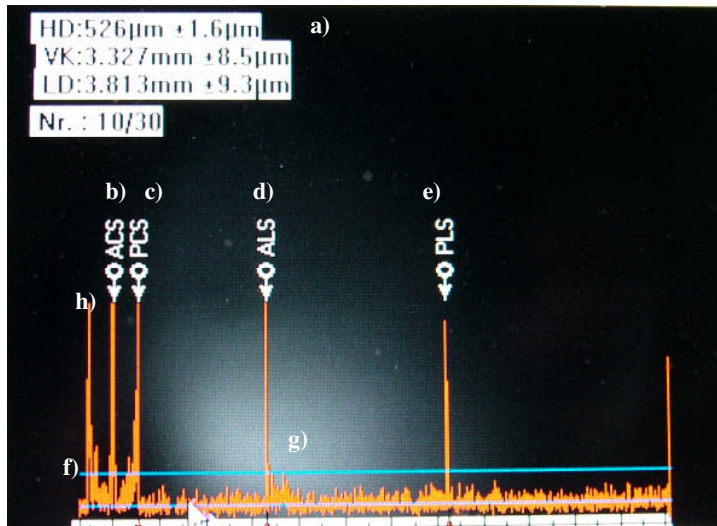


Abb. 11: Interferenzmuster des ACMaster.

- (a) Anzeige der Mittelwerte mit Standardabweichungen, hier: geometrische Weglängen
- b) Hornhautvorderfläche c) Hornhauthinterfläche, d) Linsenvorderfläche,
- e) Linsenrückfläche, f) Rauschamplitude, g) Artefakt aus der Linse,
- h) erstes Signal (PCS entsprechend) des negativen Interferogramnteils links vom Ursprung (Position ACS).

Diese Messungen wurden pro Auge 30-mal ausgeführt. Eine Nachjustierung der beiden Reflexe war während der Messungen jederzeit möglich.

Dieser Messzyklus wiederholte sich inklusive WzW-Bestimmung bei -1, -3 und -5d. Je stärker die Probanden akkommodierten, desto höher waren die Anforderungen an Konzentration und Kooperation der Probanden.

3.3 Hauptuntersuchungen

Die Hauptuntersuchungen fanden ebenfalls am ACMaster der Firma Carl Zeiss Meditec statt.

Anstelle eines X wurden die Probanden aufgefordert, einen Punkt (Symbol P), ein blinkendes X (Symbol B), einen Landoltring mit drehbarer Öffnung und dadurch acht verschiedenen Orientierungen (Symbol L) und ein E (Symbol E) zu fixieren. Das Symbol E unterschied sich von den anderen vier Symbolen darin, dass diesmal der

Hintergrund weiß war und somit für die Schärfe verantwortlich war, wohingegen das E schwarz blieb.

In Abb. 12 sind die Symbole in etwa zweifacher Vergrößerung schematisch dargestellt. (Durch die Optik/Auflösung erschienen die Symbole jedoch nicht in weiß, sondern stellten sich in den Pixeln rot, grün und blau dar.)

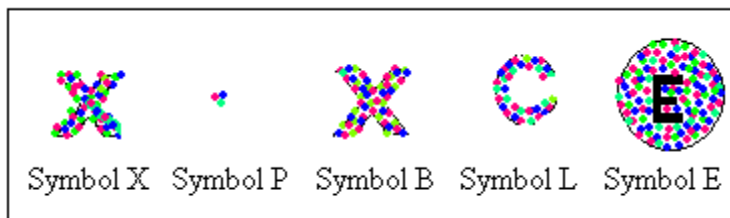


Abb. 12: schematische Darstellung der Symbole in etwa zweifacher Vergrößerung.

Wie bei der Voruntersuchung erfolgte zunächst vor jedem Messzyklus die dreimalige WzW-Bestimmung und die Auswahl eines mittleren Wertes. Ziel war es auch hier, die Reflexe übereinander zu lagern, um optimale Messergebnisse zu erzielen.

Um Verfälschungen der Messergebnisse vorzubeugen, wurden den Probanden zunächst alle vier Symbole bei 0d präsentiert, anschließend alle vier bei -1d, dann bei -3d und bei -5d. Zunächst blickte der Proband entspannt auf das Symbol P. Es wurden analog zu dem Symbol X 30 Messungen pro Auge durchgeführt, wobei die Probanden auch hier zwischen den Messungen aufgefordert wurden zu zwinkern, um den Tränenfilm nicht abreißen zu lassen. Nach diesen Messzyklen erfolgten für die Symbole B, L und E jeweils zwei weitere bei 0d. Lediglich bei dem Symbol L wurde nach 10 Messungen die Öffnung des Landoltrings gedreht, um dem Auge einen neuen Reiz zu präsentieren. Anschließend erfolgten die Messzyklen bei -1, -3 und -5d. Die Messungen wurden erst dann begonnen, wenn die Probanden angaben, das jeweilige Symbol scharf zu sehen. Die Reihenfolge der Symbole blieb unverändert, und die Öffnung des Landoltrings wurde konstant nach 10 Messungen verändert.

Besonders die Einstellungen bei -3 und -5d erforderten die Konzentration der Probanden, so dass zwischen den einzelnen Messzyklen kleine Unterbrechungen erforderlich waren.

Nachdem die Messungen durchgeführt wurden, erfolgte die Auswertung am ACMaster. Reflexe, die die Software trotz gutem Signal-Rausch-Verhältnis nicht richtig zuordnete,

wurden mittels Maus manuell ausgewertet. Die Standardabweichungen der okulären Teilstrecken stiegen bei den Messreihen -3 und -5d besonders bei der vorderen Linsenkante und der Linsendicke häufig an. Diese Abweichungen sind auf die Fixations-Anstrengung zurückzuführen, da es schwierig war, diese starke Akkommodation über einen längeren Zeitraum aufrecht zu erhalten.

Die Werte wurden ausgedruckt und ausgewertet.

Die statistische Auswertung fand am PC unter Microsoft Windows XP statt. Neben SPSS 13.0.1 (SPSS, Inc.) für Windows wurde auch Microsoft Excel (Version 2002) eingesetzt.

4 Ergebnisse

In diesem Kapitel sind die ermittelten Messdaten aufgeführt. Diese schließen den Vergleich der mit den unterschiedlichen, als Akkommodationsreiz verwendeten Symbolen erhaltenen Ergebnisse ein, inklusive den Ergebnissen der Voruntersuchung.

4.1 Ergebnisse der Voruntersuchung

Das durchschnittliche SEQ aller Augen betrug $-0,046 \pm 0,651d$; es ergab sich eine Spanne von $-1,875$ bis $+0,750d$.

Bei der Untersuchung am ACMaster ließ sich feststellen, dass bei allen 40 Augen eine Änderung von ALS und PLS stattfand.

Somit kam es zu einer Änderung von VK und LD.

4.2 Ergebnisse der Hauptuntersuchung

Vorab lässt sich festhalten, dass das Interferenzmuster des ACMaster unterschiedliche Qualitäten zeigte, die abhängig waren von der Überlagerung der Reflexe.

Die Abbildungen 13 - 15 stellen dies graphisch dar.

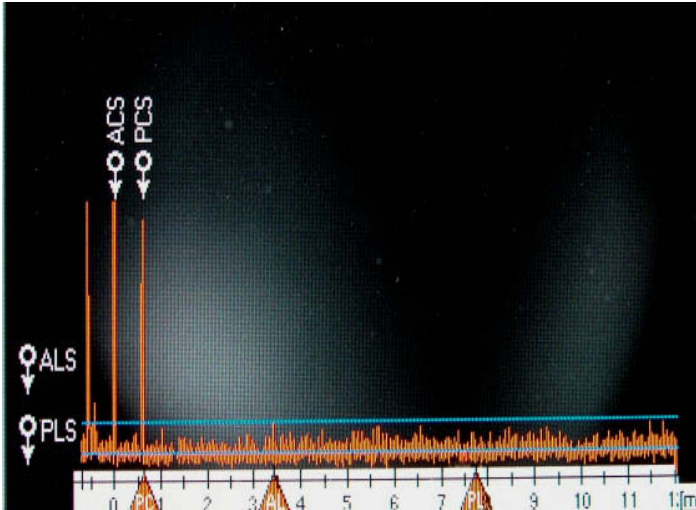


Abb. 13: nicht vollständig auswertbare Messung. Lediglich die Peaks ACS und PCS sind erkennbar. Hier kann ALS und PLS nicht bestimmt werden.

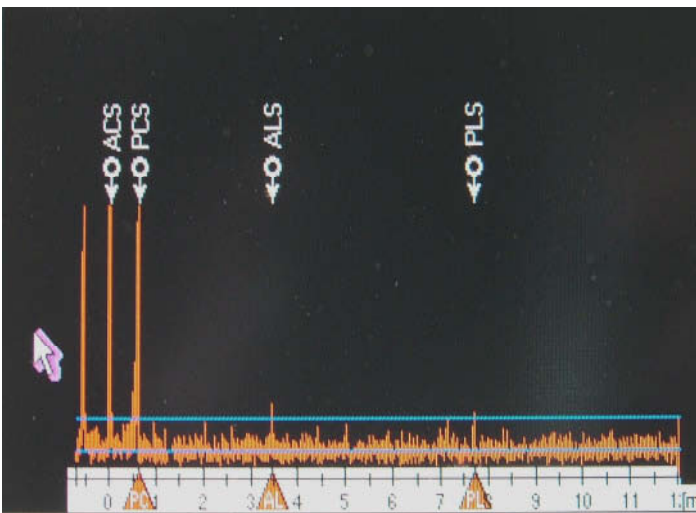


Abb. 14: gerade noch auswertbare Messung. ALS und PLS sind gerade noch zu erkennen. Die Hornhautdicke ist wiederum ideal dargestellt.

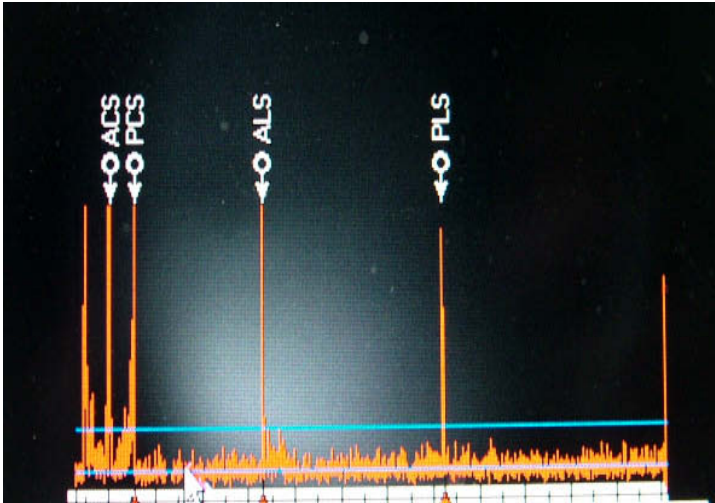


Abb. 15: gut auswertbare Messung.

In Abb. 15 sind alle Peaks optimal dargestellt. Leider war dieses optimale Interferenzmuster nur bei wenigen Probanden zu sehen.

4.2.1. Summenauswertung

Untersucht wurden die Änderungen der Hornhautdicke ΔHD , der Vorderkammertiefe ΔVK , der Linsendicke ΔLD und der Position des posterioren Linsenpols ΔPLS gegenüber den entsprechenden Werten ohne Akkommodation bei allen fünf Symbolen und allen Augen. Diese Änderungen wurden miteinander verglichen.

Tabelle 1 gibt die durchschnittliche akkommodative Änderung (Δ) aller 40 Augen für die fünf Symbole wieder. Die Mittelwerte von ΔHD , ΔVK , ΔLD und ΔPLS über alle Augen und alle fünf Symbole sind in optischer und in geometrischer Weglänge angegeben.

Die Umrechnung von optischer zu geometrischer Weglänge erfolgte gemäß der Formel: geom. Weglänge = optische Weglänge / 1,37 (Haigis 2006).

Reiz [d]	Symbol	ΔHD [mm]	ΔVK [mm]	ΔLD [mm]	ΔPLS [mm]
-1	X	0,000 ± 0,001	0,036 ± 0,061	0,048 ± 0,060	0,010 ± 0,012
	P	0,001 ± 0,002	0,019 ± 0,035	0,027 ± 0,042	0,012 ± 0,011
	B	0,001 ± 0,002	0,020 ± 0,035	0,031 ± 0,039	0,013 ± 0,013
	L	0,002 ± 0,003	0,035 ± 0,032	0,047 ± 0,038	0,012 ± 0,015
	E	0,001 ± 0,002	0,027 ± 0,034	0,034 ± 0,040	0,009 ± 0,013
MW	opt. Wegl.	0,001 ± 0,001	0,027 ± 0,007	0,037 ± 0,009	0,011 ± 0,001
	geom. Wegl.	0,001 ± 0,000	0,020 ± 0,005	0,027 ± 0,006	0,008 ± 0,001
-3	X	0,000 ± 0,002	0,190 ± 0,080	0,231 ± 0,081	0,040 ± 0,022
	P	0,001 ± 0,002	0,158 ± 0,080	0,192 ± 0,089	0,037 ± 0,037
	B	0,001 ± 0,002	0,155 ± 0,081	0,194 ± 0,087	0,038 ± 0,025
	L	0,002 ± 0,003	0,187 ± 0,083	0,221 ± 0,086	0,035 ± 0,030
	E	0,002 ± 0,002	0,182 ± 0,073	0,214 ± 0,081	0,030 ± 0,028
MW	opt. Wegl.	0,001 ± 0,000	0,175 ± 0,015	0,210 ± 0,015	0,036 ± 0,004
	geom. Wegl.	0,001 ± 0,000	0,127 ± 0,011	0,153 ± 0,011	0,026 ± 0,003
-5	X	0,000 ± 0,002	0,328 ± 0,094	0,401 ± 0,102	0,074 ± 0,033
	P	0,002 ± 0,002	0,300 ± 0,108	0,371 ± 0,128	0,075 ± 0,049
	B	0,001 ± 0,003	0,289 ± 0,120	0,359 ± 0,133	0,068 ± 0,036
	L	0,002 ± 0,004	0,328 ± 0,107	0,392 ± 0,120	0,064 ± 0,042
	E	0,002 ± 0,002	0,313 ± 0,096	0,369 ± 0,109	0,056 ± 0,043
MW	opt. Wegl.	0,001 ± 0,001	0,312 ± 0,015	0,378 ± 0,015	0,067 ± 0,006
	geom. Wegl.	0,001 ± 0,001	0,228 ± 0,011	0,276 ± 0,011	0,049 ± 0,004

Tab. 1: akkommodative Änderung aller Augen (n=40) der optischen Weglängen mit den Mittelwerten von ΔHD , ΔVK , ΔLD und ΔPLS über alle Augen und alle fünf Symbole. Mittelwerte von ΔHD , ΔVK , ΔLD und ΔPLS über alle Augen und alle Symbole werden zusätzlich in geometrischer Weglänge angegeben.

Alle Distanzangaben in mm.

$$\Delta\text{HD} = \text{HD} (-1\text{d}) - \text{HD} (0\text{d})$$

$$= \text{HD} (-3\text{d}) - \text{HD} (0\text{d})$$

$$= \text{HD} (-5\text{d}) - \text{HD} (0\text{d})$$

$$\Delta\text{VK} = \text{analog } \Delta\text{HD}$$

$$\Delta\text{LD} = \text{analog } \Delta\text{HD}$$

$$\Delta\text{PLS} = \text{analog } \Delta\text{HD}$$

In den Diagrammen der Abb. 16 werden die über alle Augen gemittelten Distanzänderungen ΔHD , ΔVK , ΔLD und ΔPLS für verschiedene Reizstärken und Symbole dargestellt.

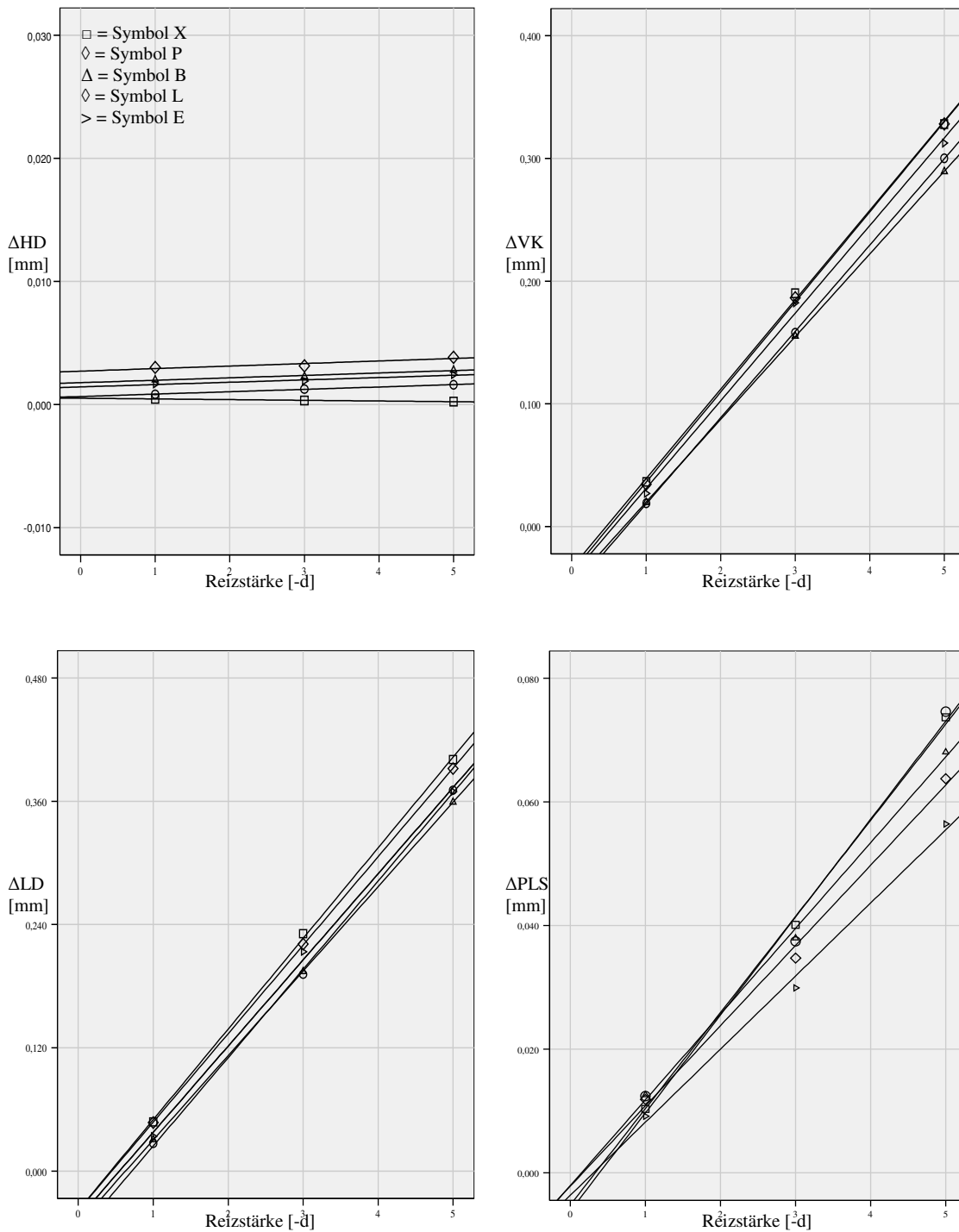


Abb. 16: Mittelwerte der Distanzänderungen für verschiedene Reizstärken und Symbole.
 Δ HD: Diagramm links oben, Δ VK: Diagramm rechts oben,
 Δ LD: Diagramm links unten, Δ PLS: Diagramm rechts unten

Die Hornhautdicke blieb konstant, die Vorderkammer verkleinerte sich, die Linse nahm an Dicke zu, und der hintere Linsenpol bewegte sich nach posterior.

Um feststellen zu können, ob die akkommodativen Änderungen für die fünf Symbole im Vergleich untereinander alle gleich sind, oder ob merkliche Unterschiede untereinander festzustellen sind, wurden die Mittelwerte (= MW) mit dazugehörigem Konfidenzintervall (= KI) bei einer Reizstärke von -5d ermittelt, da bei dieser Reizstärke die größten Änderungen auftreten. Die Unter (= UG)- und Obergrenze (= OG) werden mit angegeben.

Diese Untersuchung soll zeigen, ob die Mittelwerte für ein Symbol in den Konfidenzintervallen der anderen Symbole liegen.

Tabelle 2 gibt die Mittelwerte und die dazugehörige Unter- und Obergrenze an.

Messgröße	Symbol	UG	MW	OG
Δ HD	X	-0,001	0,000	0,001
	P	0,001	0,002	0,002
	B	0,000	0,001	0,002
	L	0,001	0,002	0,002
	E	0,001	0,002	0,003
Δ VK	X	0,298	0,328	0,358
	P	0,265	0,300	0,335
	B	0,251	0,289	0,328
	L	0,293	0,328	0,363
	E	0,282	0,313	0,344
Δ LD	X	0,368	0,401	0,434
	P	0,329	0,371	0,412
	B	0,316	0,359	0,402
	L	0,353	0,392	0,431
	E	0,334	0,369	0,405
Δ PLS	X	0,063	0,074	0,084
	P	0,059	0,075	0,090
	B	0,056	0,068	0,080
	L	0,050	0,064	0,077
	E	0,043	0,057	0,070

Tab. 2: Mittelwerte der biometrischen Änderungen bei einem Reiz von -5d in optischer Weglänge für die einzelnen Symbole. Ausnahmen sind markiert.

Alle Angaben in mm.

UG = Untergrenze

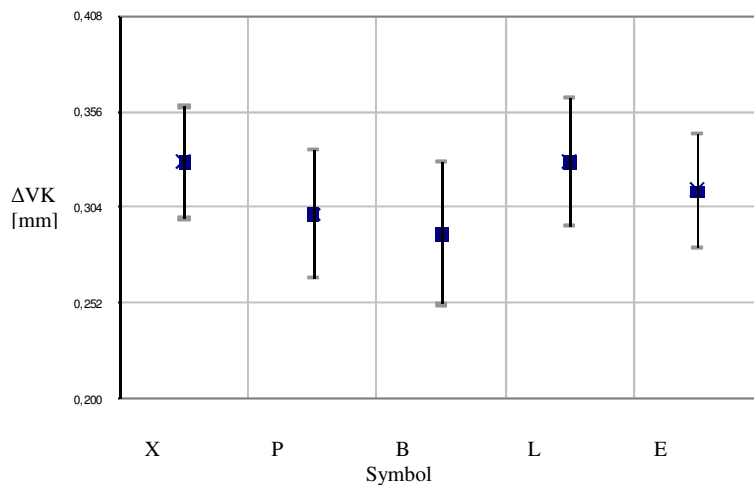
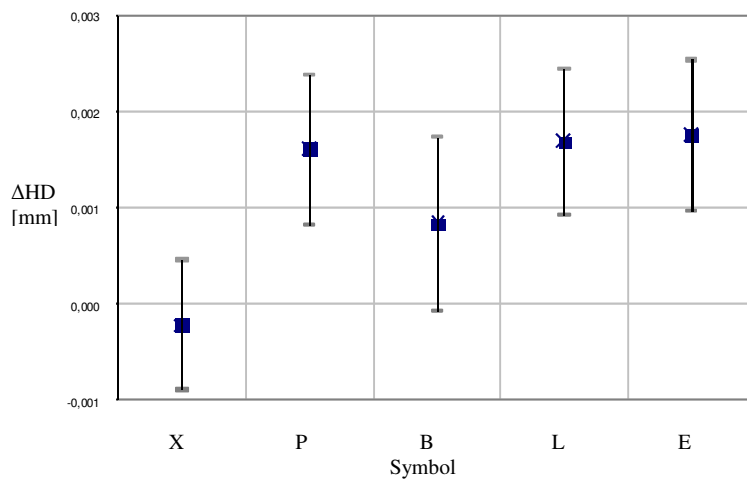
MW = Mittelwerte

OG = Obergrenze

Aus der Tabelle geht hervor, welche Mittelwerte für ein Symbol jeweils im Konfidenzintervall der anderen liegen. Bei Δ HD liegt der Mittelwert des Symbol X

nicht in den Konfidenzintervallen der Symbole P, L und E; die Mittelwerte von P, L und E liegen nicht im Konfidenzintervall des Symbol X. Bei ΔVK und ΔLD liegt der Mittelwert des Symbol B nicht im Konfidenzintervall des Symbol X und bei ΔPLS liegen die Mittelwerte der Symbole X und P nicht im Konfidenzintervall von E, der Mittelwert von Symbol E nicht in den Konfidenzintervallen von X und P.

Die Diagramme in Abb. 17 stellen graphisch die Ergebnisse aus Tabelle 2 dar. Die Fehlerbalken entsprechen hier nicht der Standardabweichung, sondern stellen das Konfidenzintervall dar.



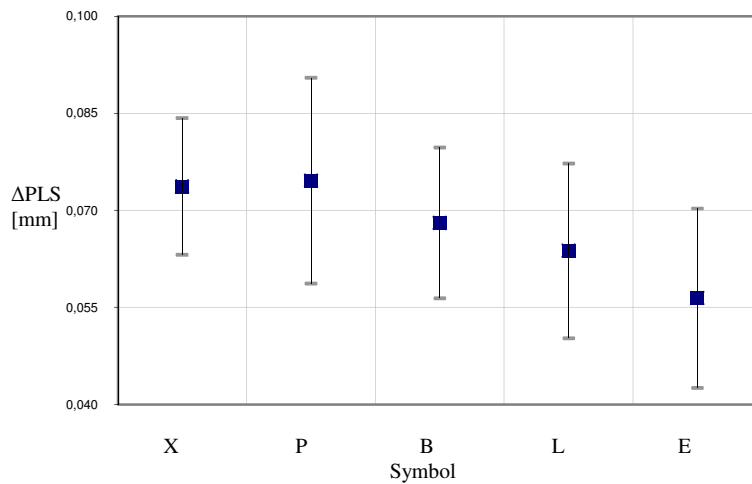
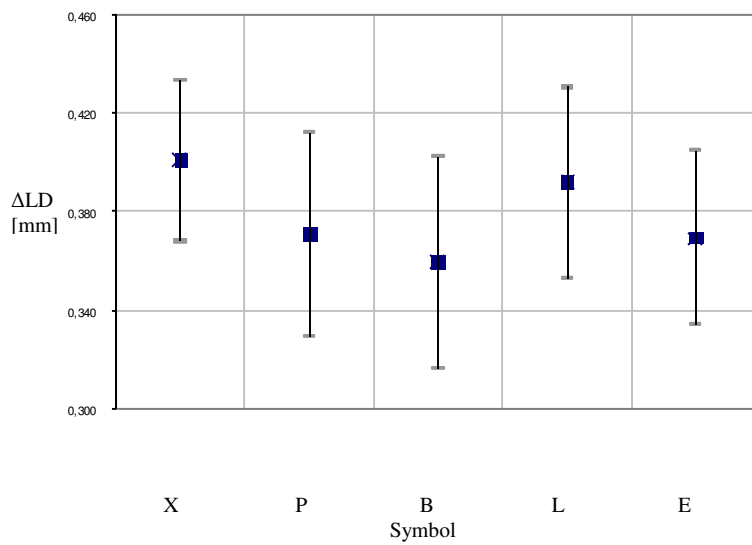


Abb. 17: Mittelwerte (blau) der biometrischen Änderungen in optischen Weglängen mit dazugehöriger Unter- und Obergrenze (grau) für die einzelnen Reize bei einer Reizstärke von -5d.
 von oben nach unten: ΔHD , ΔVK , ΔLD , ΔPLS

Um graphisch zu verdeutlichen, wie sich die Mittelwerte, der Interquartilbereich und die Zahl der Ausreißer verhalten, werden als Beispiel Boxplots für die Linsendicke bei -5d in Abb. 18 aufgezeigt.

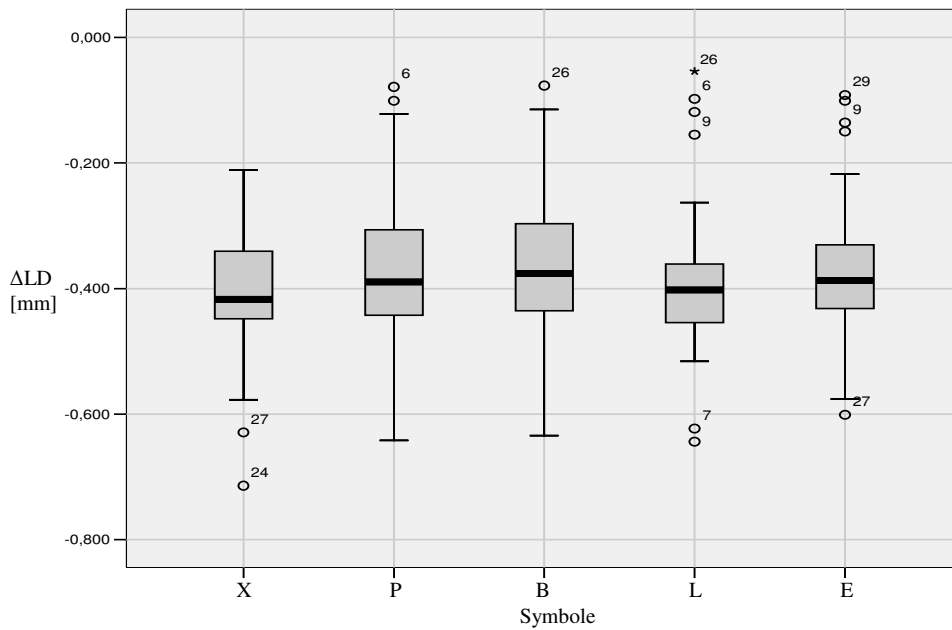
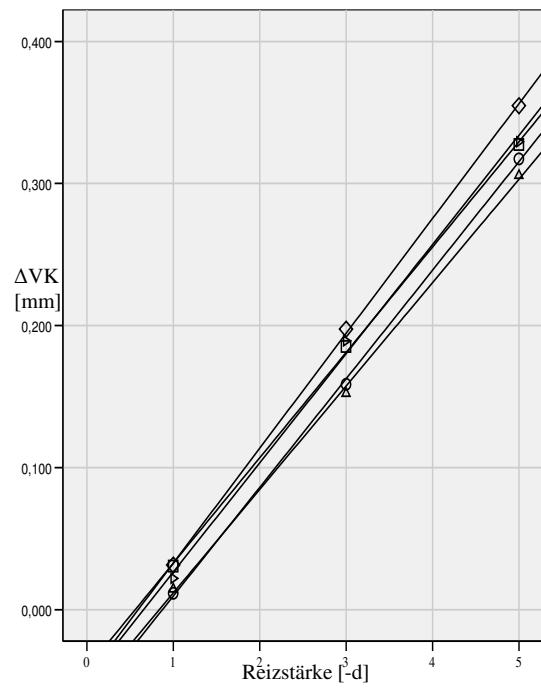
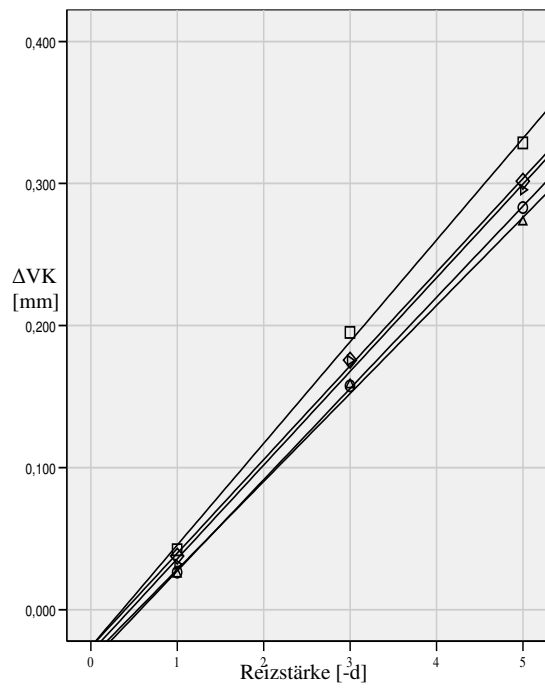
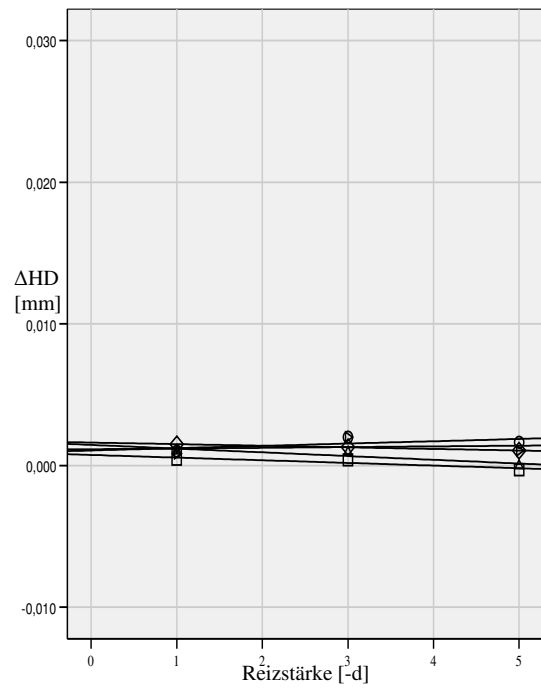
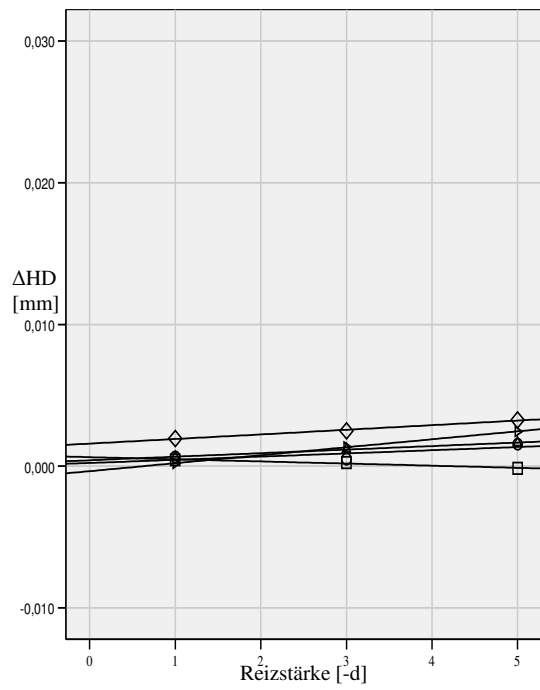


Abb. 18: Boxplots zum graphischen Vergleich der Mittelwerte von ΔLD bei -5d.

Aus der Grafik ist ersichtlich, dass die Mittelwerte sich etwa bei gleichen Werten einpendeln. Der Interquartilbereich des Symbol B ist am größten, der des Symbol L am kleinsten, wohingegen bei diesem Symbol die Ausreißerzahl mit sechs Probanden am Größten ist.

Bei Trennung der Ergebnisse nach Geschlechtern sind visuell ebenfalls keine Änderungen festzustellen. Die Diagramme in Abb. 19 stellen jeweils ΔHD , ΔVK , ΔLD und ΔPLS dar. Die linken Diagramme sind den männlichen Probanden zuzuordnen, die rechten den weiblichen.



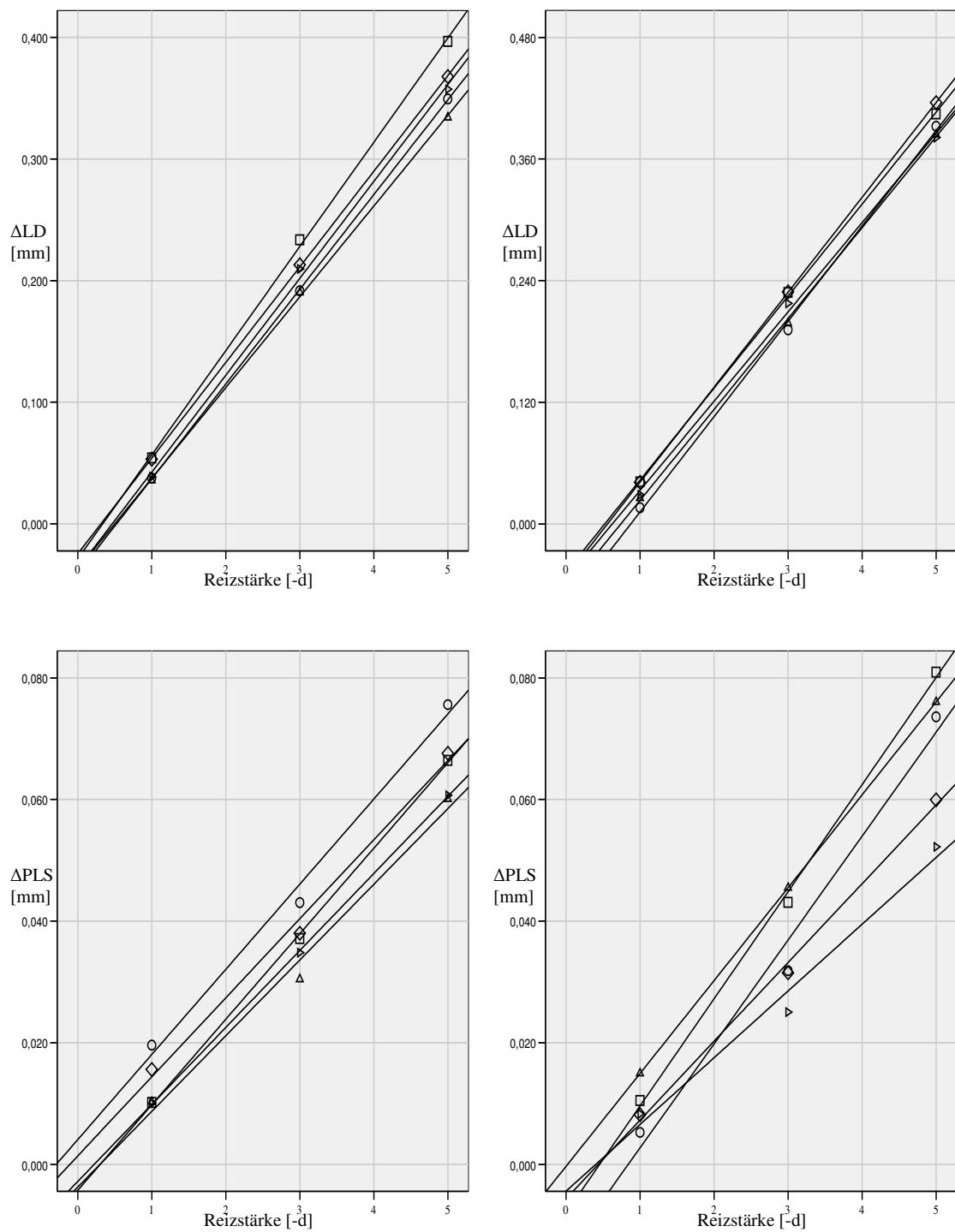


Abb. 19: Trennung der Ergebnisse nach Geschlechtern, links männl. Probanden, rechts weibl. Probanden; von oben nach unten: ΔHD , ΔVK , ΔLD , ΔPLS .
 Legende wie in Abb.16

In Tabelle 3 werden die Mittelwerte und Konfidenzintervalle der männlichen und weiblichen Probanden bei einer Reizstärke von -5d dargestellt, um festzustellen, ob merkliche Unterschiede bestehen.

Messgröße	Symbol	Geschlecht	UG	MW	OG
ΔVK	X	m	0,280	0,329	0,377
		w	0,286	0,327	0,368
	P	m	0,222	0,283	0,344
		w	0,279	0,317	0,356
	B	m	0,207	0,273	0,360
		w	0,261	0,306	0,351
	L	m	0,235	0,302	0,368
		w	0,331	0,355	0,378
	E	m	0,235	0,257	0,357
		w	0,310	0,329	0,349

ΔLD	X	m	0,345	0,397	0,449
		w	0,360	0,404	0,449
	P	m	0,275	0,349	0,424
		w	0,350	0,392	0,435
	B	m	0,261	0,334	0,407
		w	0,334	0,384	0,435
	L	m	0,292	0,368	0,443
		w	0,390	0,416	0,442
	E	m	0,288	0,358	0,427
		w	0,357	0,381	0,406

ΔPLS	X	m	0,054	0,066	0,079
		w	0,063	0,081	0,099
	P	m	0,046	0,076	0,105
		w	0,058	0,074	0,089
	B	m	0,044	0,060	0,076
		w	0,058	0,076	0,094
	L	m	0,050	0,068	0,085
		w	0,038	0,060	0,082
	E	m	0,042	0,061	0,079
		w	0,030	0,052	0,074

Tab. 3: Mittelwerte und Konfidenzintervalle der biometrischen Änderungen bei einem Reiz von -5d (in optischen Weglängen) für die einzelnen Symbole und Trennung der Ergebnisse nach Geschlechtern. Alle Angaben in mm.

UG = Untergrenze

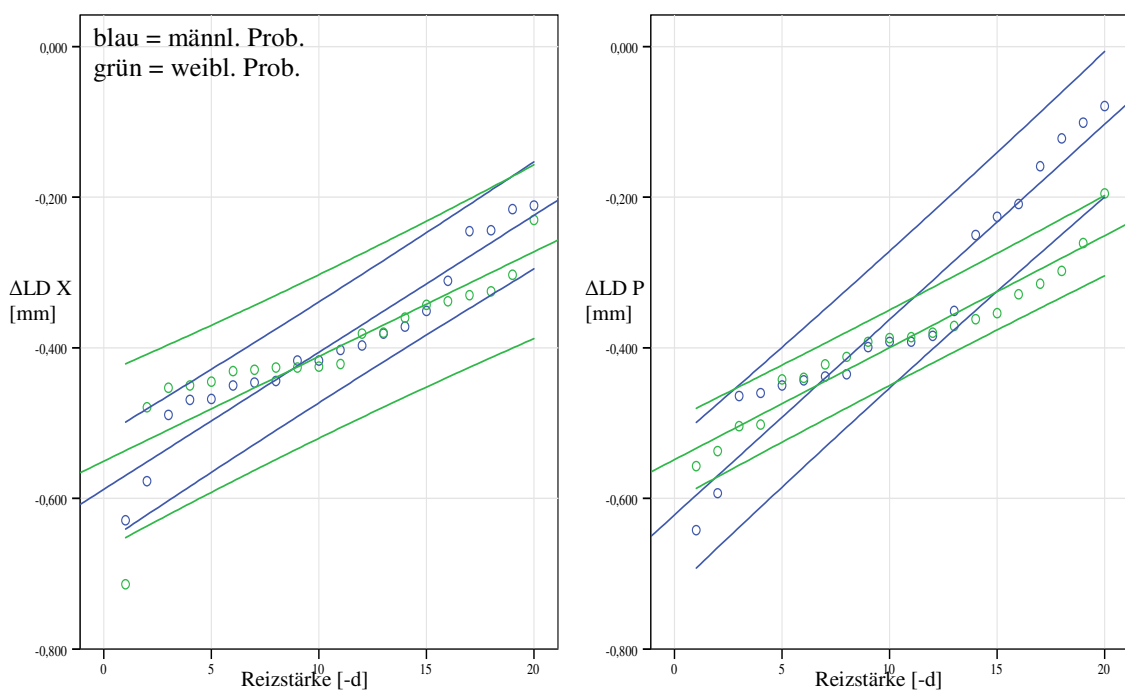
MW = Mittelwert

OG = Obergrenze

Aus Tabelle 3 geht hervor, dass bei der Vorderkammertiefenänderung Symbol E eine Ausnahme darstellt, bei der Linsendickenänderung sind es die Symbole P und L, bei der Änderung der Position des posterioren Linsenpols ist es Symbol X.

Im t-Test konnten jedoch keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden.

Als Beispiele seien hier nur die Diagramme der Linsendicke in Abb. 20 mit dem jeweiligen Konfidenzintervall aufgeführt, beginnend bei -1d, da bei 0d keine Distanzänderung vorliegt.



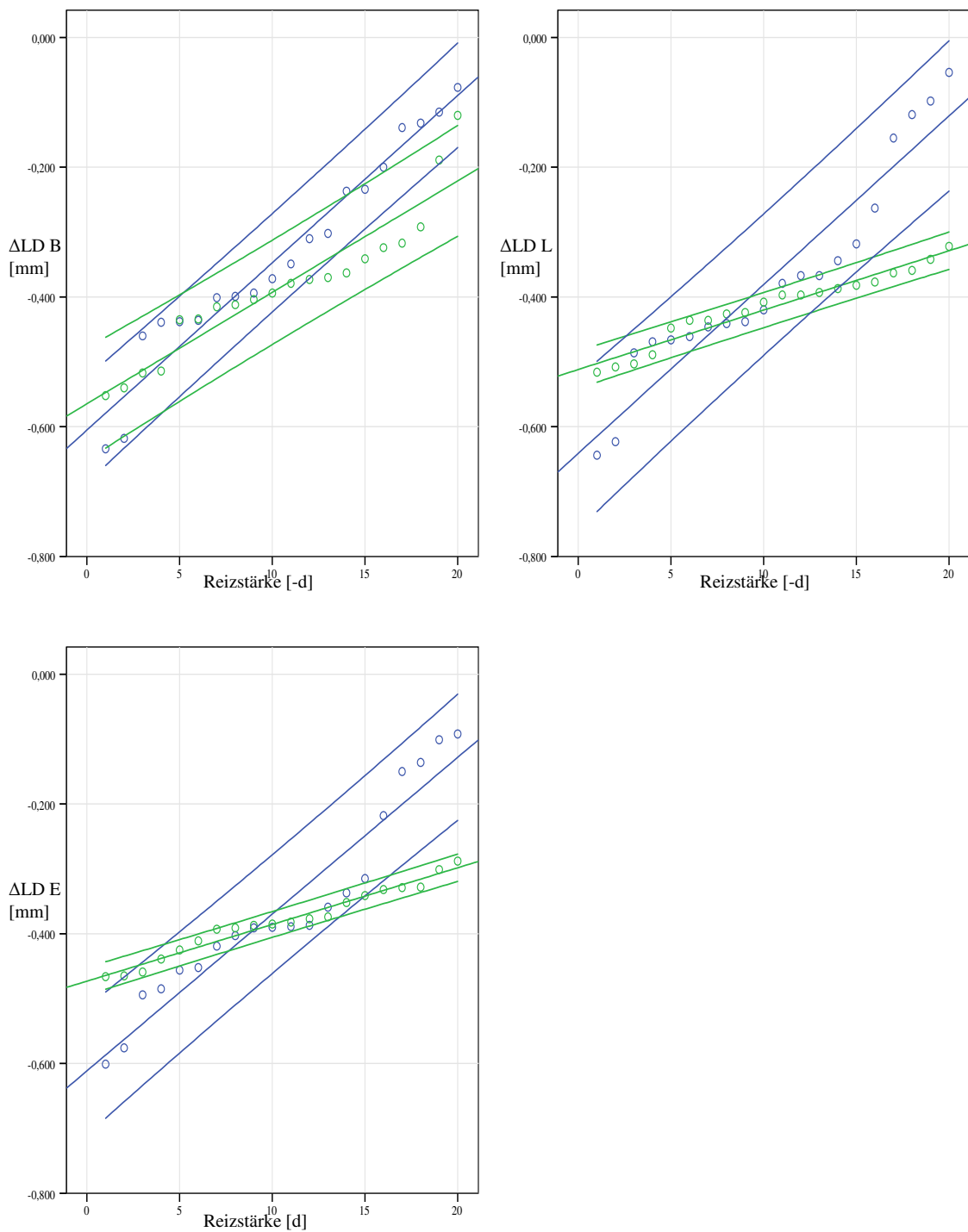


Abb. 20: Vergleich der Distanzänderungen für verschiedene Reizstärken und Symbole
 Der Linsendickenänderung der männlichen und weiblichen Probanden.
 Symbole X, P, B, L, E: von links oben nach unten gelesen.
 blau = Anpassungslinie mit KI (männl. Probanden)
 grün = Anpassungslinie mit KI (weibl. Probanden)

Zusätzlich wurde untersucht, ob tendenziell myope, bzw. tendenziell hyperope Probanden Unterschiede bezüglich der Symbolauswahl aufweisen. Bei 8 Probanden konnte eine leichte Myopie (-0,670d) festgestellt werden, bei 10 Probanden eine leichte Hyperopie (+0,444d).

Tabelle 4 zeigt die Mittelwerte mit Konfidenzintervallen für die hyperopen Probanden bei einer Reizstärke von -5d, da hier die größten Änderungen stattfanden.

Messgröße	Symbol	UG	MW	OG
VK	X	0,302	0,343	0,384
	P	0,309	0,358	0,407
	B	0,304	0,355	0,405
	L	0,314	0,371	0,427
	E	0,295	0,340	0,385
LD	X	0,472	0,433	0,394
	P	0,500	0,447	0,395
	B	0,492	0,440	0,387
	L	0,513	0,458	0,402
	E	0,468	0,421	0,373
PLS	X	0,100	0,090	0,080
	P	0,123	0,098	0,073
	B	0,097	0,083	0,069
	L	0,104	0,086	0,068
	E	0,099	0,080	0,062

Tab. 4: Mittelwerte und Konfidenzintervalle der biometrischen Änderungen bei einer Reizstärke von -5d (in optischen Weglängen) für die einzelnen Symbole bei hyperopen Probanden. Alle Angaben in mm.

UG = Untergrenze
 MW = Mittelwert
 OG = Obergrenze

Aus der Tabelle geht hervor, dass die Mittelwerte für ein Symbol jeweils im Konfidenzintervall der anderen Symbole liegen. Beim Vergleich der Mittelwerte mittels t-Test konnten ebenfalls keine signifikanten Unterschiede bezüglich der Reizauswahl bei hyperopen Probanden festgestellt werden.

Tabelle 5 zeigt die Mittelwerte mit Konfidenzintervallen für die myopen Probanden bei einer Reizstärke von -5d.

Messgröße	Symbol	UG	MW	OG
VK	X	0,249	0,307	0,366
	P	0,184	0,227	0,269
	B	0,152	0,204	0,256
	L	0,226	0,282	0,339
	E	0,225	0,278	0,330
LD	X	0,298	0,363	0,428
	P	0,225	0,280	0,334
	B	0,201	0,260	0,320
	L	0,262	0,324	0,385
	E	0,256	0,311	0,367
PLS	X	0,036	0,056	0,075
	P	0,033	0,052	0,070
	B	0,033	0,055	0,077
	L	0,024	0,043	0,061
	E	0,015	0,034	0,053

Tab. 5: Mittelwerte und Konfidenzintervalle der biometrischen Änderungen bei einer Reizstärke von -5d (in optischen Weglängen) für die einzelnen Symbole bei myopen Probanden. Alle Angaben in mm. Ausnahmen sind markiert.

UG = Untergrenze
 MW = Mittelwert
 OG = Obergrenze

Aus der Tabelle ist ersichtlich, dass bei der Vorderkammertiefe die Mittelwerte der Symbole P und B nicht in den Konfidenzintervallen der Symbole X, L und E liegen, die Mittelwerte von X, L und E liegen ebenfalls nicht in den Konfidenzintervallen von P und B. Bei der Linsendicke liegt der Mittelwert von Symbol X nicht im Konfidenzintervall von Symbol P und B, der von P nicht im Konfidenzintervall von X und der von Symbol L nicht im Konfidenzintervall von Symbol B. Beim posterioren Linsenpol liegen die Mittelwerte von Symbol X und B nicht im Konfidenzintervall des Symbol E, der Mittelwert von E liegt nicht im Konfidenzintervall von Symbol X.

Bei der Durchführung des t-Test für myope Probanden ergaben sich signifikante Änderungen bei der Vorderkammertiefe und der Linsendicke bei den Symbolen P und B.

Tabelle 6 zeigt die p-Werte für den Vergleich der Vorderkammertiefen und der Linsendicken für die Symbole P und B bei -5d.

Messgröße	Symbol	p-Wert
VK	P	0,024
	B	0,009
LD	P	0,044
	B	0,019

Tab. 6: p-Werte der Vorderkammertiefe und der Linsendicke für die Symbole P und B.

4.2.2 Vergleich der Standardabweichungen der Absolutwerte

Bei dieser Auswertung werden die Mittelwerte der Standardabweichungen, die der ACMaster pro Mess-Serie aus 30 Einzelmessungen für die Absolutwerte der Hornhautdicke, Vorderkammertiefe, Linsendicke und den posterioren Linsenpol angab, miteinander verglichen.

Tabelle 7 gibt die Mittelwerte der Standardabweichung für die 40 Augen und die fünf Symbole wieder und die dazugehörigen Standardabweichungen.

Reiz [d]	MW	HD [mm]	VK [mm]	LD [mm]	PLS [mm]
0	X	0,003 ± 0,001	0,011 ± 0,011	0,011 ± 0,004	0,004 ± 0,002
	P	0,002 ± 0,001	0,008 ± 0,002	0,009 ± 0,004	0,005 ± 0,003
	B	0,002 ± 0,001	0,009 ± 0,004	0,010 ± 0,004	0,005 ± 0,004
	L	0,002 ± 0,001	0,009 ± 0,004	0,010 ± 0,005	0,004 ± 0,002
	E	0,003 ± 0,003	0,008 ± 0,003	0,009 ± 0,004	0,004 ± 0,002
-1	X	0,003 ± 0,002	0,012 ± 0,016	0,011 ± 0,003	0,005 ± 0,004
	P	0,002 ± 0,001	0,009 ± 0,003	0,010 ± 0,005	0,004 ± 0,003
	B	0,003 ± 0,003	0,009 ± 0,003	0,011 ± 0,003	0,004 ± 0,002
	L	0,002 ± 0,001	0,009 ± 0,003	0,011 ± 0,003	0,004 ± 0,002
	E	0,002 ± 0,001	0,009 ± 0,004	0,010 ± 0,004	0,004 ± 0,002
-3	X	0,002 ± 0,001	0,015 ± 0,019	0,014 ± 0,005	0,006 ± 0,003
	P	0,002 ± 0,001	0,013 ± 0,005	0,015 ± 0,006	0,006 ± 0,003
	B	0,002 ± 0,001	0,013 ± 0,004	0,015 ± 0,005	0,006 ± 0,002
	L	0,003 ± 0,002	0,013 ± 0,004	0,014 ± 0,004	0,005 ± 0,003
	E	0,002 ± 0,001	0,012 ± 0,004	0,015 ± 0,004	0,006 ± 0,002
-5	X	0,003 ± 0,001	0,016 ± 0,012	0,017 ± 0,007	0,007 ± 0,003
	P	0,002 ± 0,001	0,014 ± 0,005	0,017 ± 0,005	0,009 ± 0,004
	B	0,003 ± 0,003	0,016 ± 0,004	0,018 ± 0,005	0,009 ± 0,003
	L	0,002 ± 0,001	0,015 ± 0,004	0,017 ± 0,005	0,007 ± 0,003
	E	0,003 ± 0,002	0,019 ± 0,027	0,018 ± 0,004	0,007 ± 0,003

Tab. 7: Mittelwerte der Standardabweichungen für 40 Augen und die fünf Symbole mit dazugehöriger Standardabweichungen.

Die Diagramme in Abb. 21 stellen dies graphisch dar.

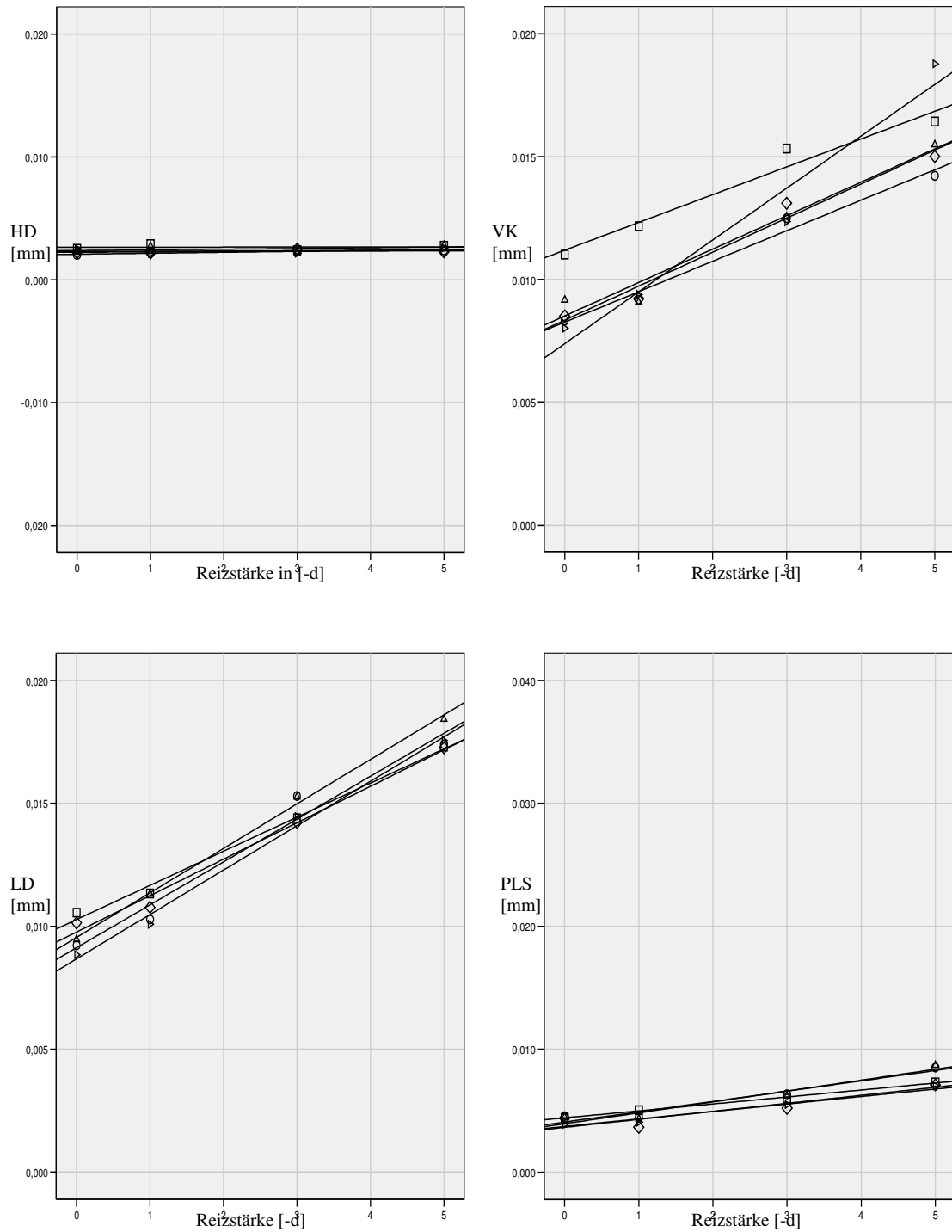


Abb. 21: Mittelwerte der Standardabweichungen. der Absolutwerte für die fünf Symbole. Legende siehe Abb.16.
 HD: Diagramm links oben, VK: Diagramm rechts oben,
 LD: Diagramm links unten, PLS: Diagramm rechts unten

Bei allen fünf Symbolen ließ sich feststellen, dass mit höheren Reizstärken auch die Standardabweichung zunahm. Diese Zunahme ist wahrscheinlich auf die erhöhte Anstrengung der Probanden zurückzuführen, da es schwer fällt, die Akkommodation bei -3d und -5d über einen längeren Zeitraum konstant zu halten.

In Tabelle 8 sind die Mittelwerte der Standardabweichungen aller Symbole für die Hornhautdicke, die Vorderkammertiefe, die Linsendicke und den posterioren Linsenpol mit den dazugehörigen Konfidenzintervallen bei einer Reizstärke von -5d dargestellt.

Messgröße	Symbol	UG	MW	OG
HD	X	0,002	0,003	0,003
	P	0,002	0,002	0,003
	B	0,002	0,003	0,004
	L	0,002	0,002	0,003
	E	0,002	0,003	0,003
VK	X	0,013	0,016	0,020
	P	0,013	0,014	0,016
	B	0,014	0,015	0,017
	L	0,014	0,015	0,016
	E	0,010	0,019	0,027
LD	X	0,015	0,017	0,019
	P	0,016	0,017	0,019
	B	0,017	0,018	0,020
	L	0,016	0,017	0,019
	E	0,016	0,018	0,020
PLS	X	0,006	0,007	0,008
	P	0,007	0,009	0,010
	B	0,008	0,009	0,010
	L	0,006	0,007	0,008
	E	0,006	0,007	0,008

Tab. 8: Mittelwerte der Standardabweichungen der 40 Augen für die biometrischen Änderungen für einen Reiz von -5d mit den einzelnen Symbolen.

Ausnahmen sind markiert. Alle Distanzen in mm.

UG= Untergrenze

MW= Mittelwert

OG= Obergrenze

Aus Tabelle 8 geht hervor, dass bei der Hornhautdicke und der Linsendicke alle Mittelwerte im jeweiligen Konfidenzintervall der anderen liegen. Bei der

Vorderkammertiefe liegt der Mittelwert für das Symbol E nicht in den Konfidenzintervallen der Symbole P, B und L. Beim posterioren Linsenpol liegen die Mittelwerte der Symbole X, L und E nicht in den Konfidenzintervallen der Symbole P und B, die Mittelwerte der Symbole P und B allerdings auch nicht in den Konfidenzintervallen von X, L und E.

4.2.3 Standardabweichung der Absolutwerte für das favorisierte Symbol im Vergleich zur Standardabweichung für das Symbol B

Fünfzehn der zwanzig Probanden gaben an, ein Symbol zu favorisieren (7x Symbol L; 4x Symbol P; 3x Symbol E; 1x Symbol X), bei fünf Probanden spielte die Auswahl des Symbols keine Rolle. Gleichzeitig empfanden diese Fünfzehn das Symbol B als das unangenehmste, da das intermittierend auftretende X nach Angaben der Probanden die Konzentrationsfähigkeit beeinträchtigte. Um feststellen zu können, ob die subjektive Empfindung der Probanden eine Rolle spielt, wurden die vom ACMaster angegebenen Standardabweichungen der beiden Symbole miteinander verglichen und die Werte des favorisierten Symbols in aufsteigender Reihenfolge nach mit den dazugehörigen Werten des Symbol B aufgetragen.

In Tabelle 9 werden die mittleren Standardabweichungen unter verschiedenen Akkommodationsbedingungen für die Vorderkammertiefe angegeben. (Fav. = favorisiertes Symbol; B = Symbol B).

Reiz	0d		-1d		-3d		-5d	
	VK Fav	VK B	VK Fav	VK B	VK Fav	VK B	VK Fav	VK B
MW	0,008	0,009	0,010	0,009	0,015	0,013	0,015	0,015
SD	0,003	0,004	0,003	0,003	0,003	0,004	0,005	0,004

Tab. 9: Standardabweichungen für 15 Probanden / 30 Augen. Alle Distanzen in mm.

Die Diagramme in Abb. 22 stellen den Vergleich der Standardabweichungen der Absolutwerte der Vorderkammertiefe für das favorisierte Symbol und das Symbol B für 30 Augen inklusive der Konfidenzintervalle dar.

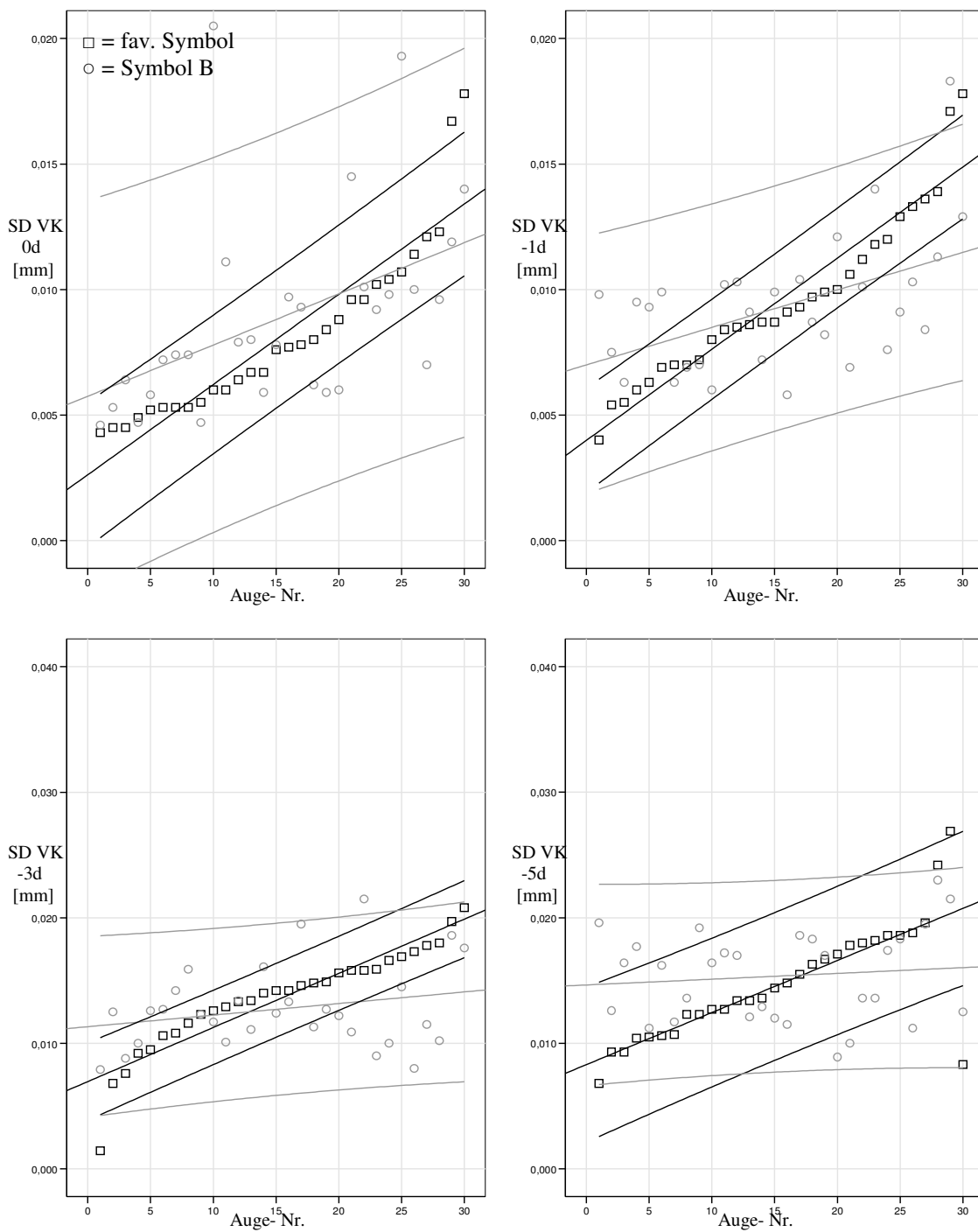


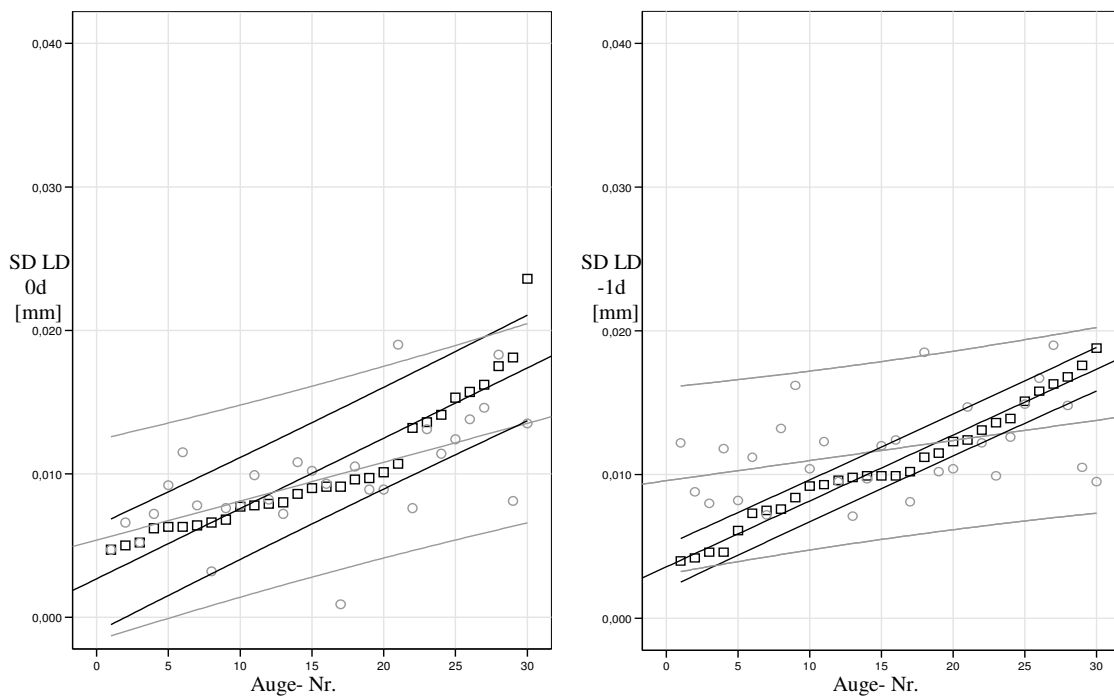
Abb. 22: Standardabweichungen der Absolutwerte für die Vorderkammertiefe des favorisierten Symbol und des Symbol B.
 schwarz = Anpassungslinie und KI fav. Symbol
 grau = Anpassungslinie und KI Symbol B

Tabelle 10 gibt die Standardabweichungen der Absolutwerte der Linsendicke mit dazugehörigen Standardabweichungen an.

Reiz	0d		-1d		-3d		-5d	
	LD Fav	LD B	LD Fav	LD B	LD Fav	LD B	LD Fav	LD B
MW	0,010	0,010	0,012	0,012	0,017	0,016	0,019	0,019
SD	0,005	0,004	0,004	0,003	0,004	0,004	0,005	0,005

Tab. 10: Standardabweichungen für 15 Probanden / 30 Augen. Alle Distanzen in mm.

Die Diagramme in Abb. 23 stellen dies wiederum für die Linsendicke graphisch dar.



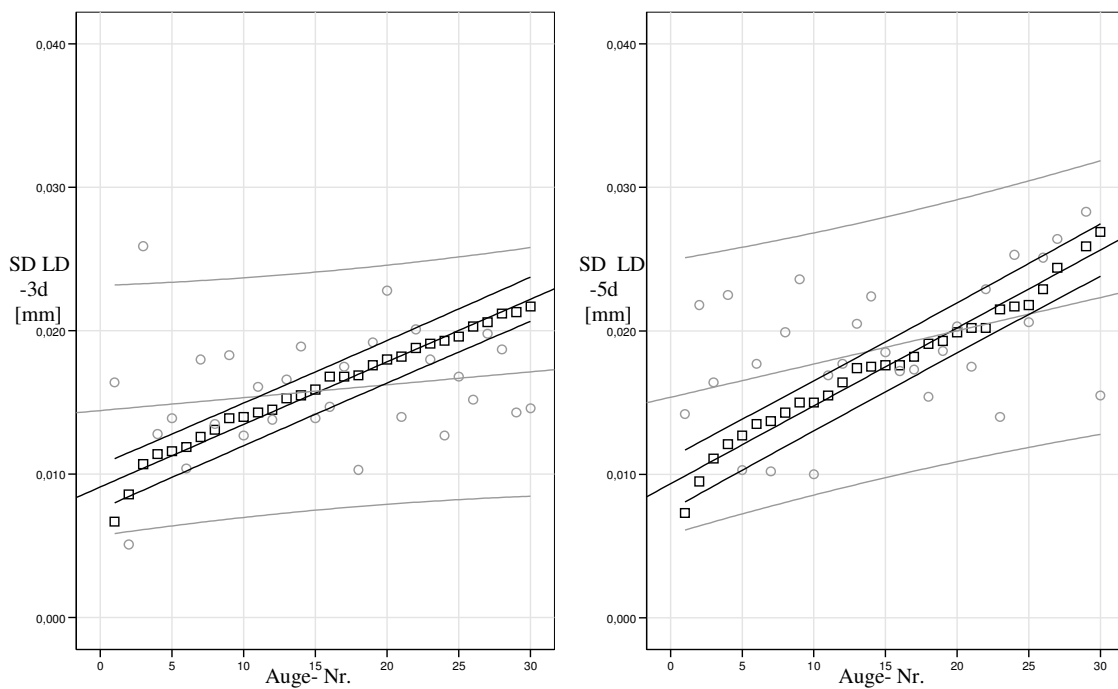


Abb. 23: Standardabweichungen der Absolutwerte für die Linsendicke des Favorisierten Symbol und des Symbol B. Legende siehe Abb. 22.
 schwarz = Anpassungslinie und KI fav. Symbol
 grau = Anpassungslinie und KI Symbol B

Tabelle 11 gibt die Standardabweichungen der Absolutwerte des hinteren Linsenpols mit den dazugehörigen Standardabweichungen an.

Reiz	0d		-1d		-3d		-5d	
	PLS Fav	PLS B	PLS Fav	PLS B	PLS Fav	PLS B	PLS Fav	PLS B
MW	0,005	0,005	0,005	0,005	0,007	0,006	0,009	0,009
SD	0,003	0,005	0,003	0,002	0,003	0,002	0,003	0,004

Tab.11: Standardabweichungen für 15 Probanden/30 Augen. Alle Distanzen in mm.

Die Diagramme in Abb. 24 stellen dies für den hinteren Linsenpol dar.

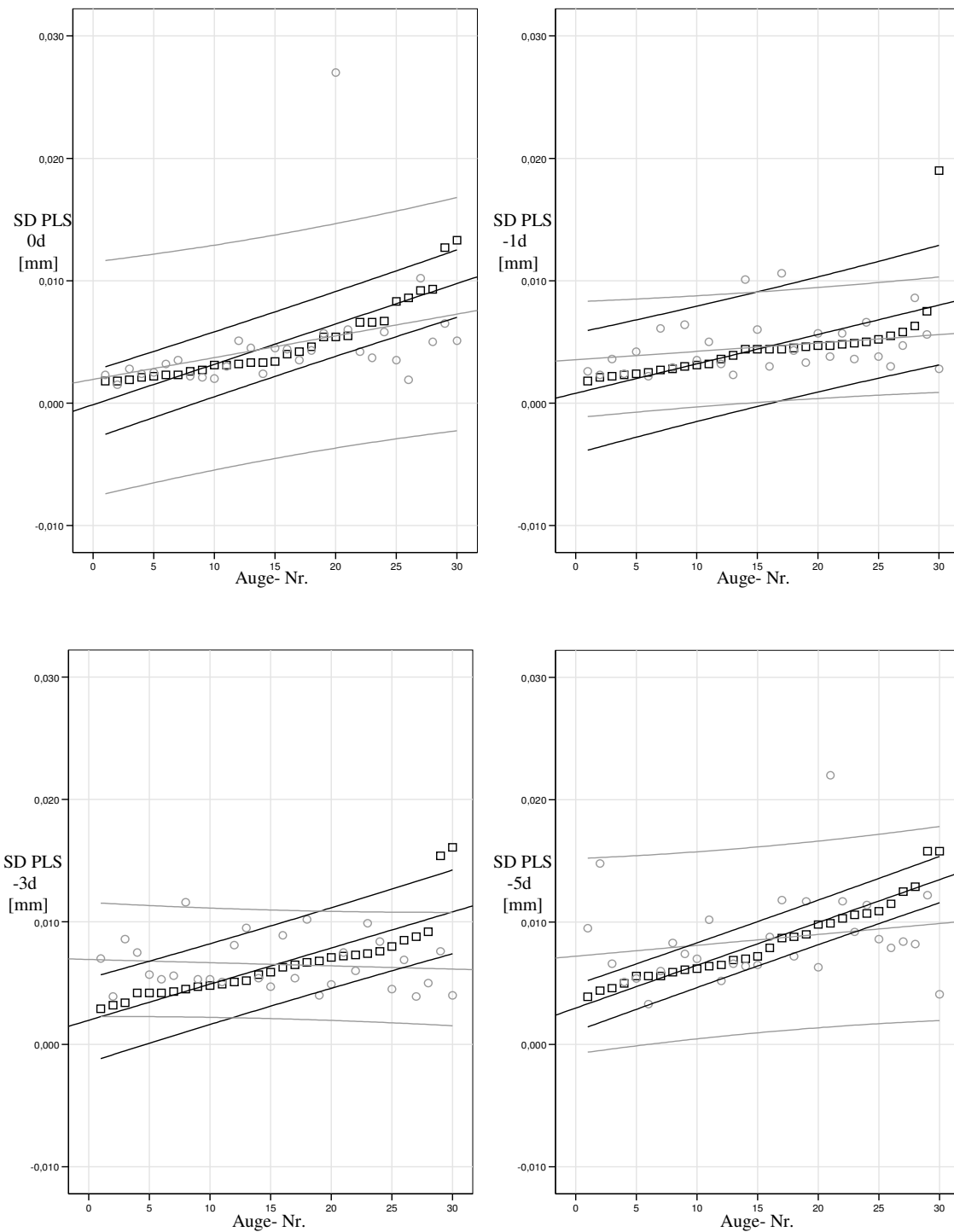
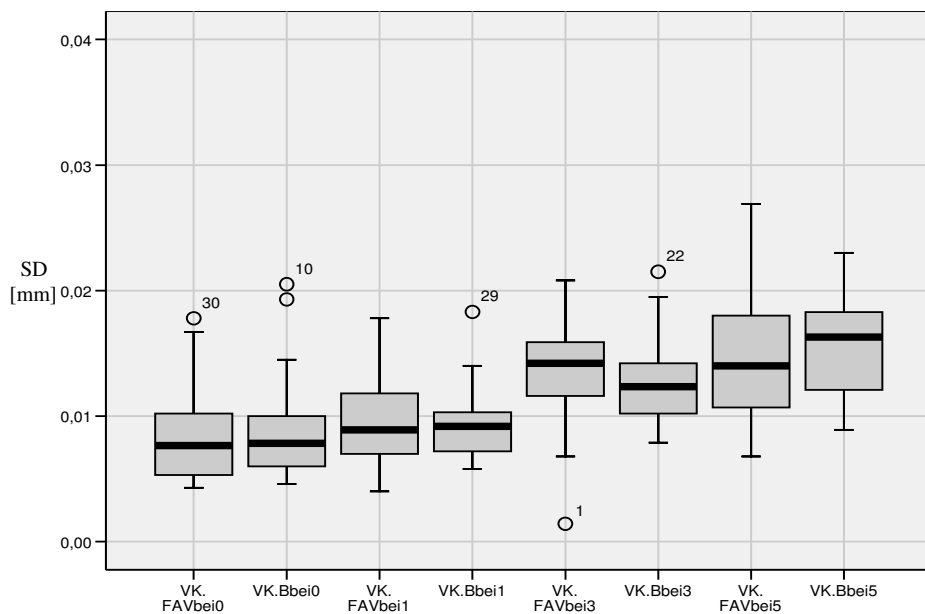


Abb. 24: Standardabweichungen der Absolutwerte für den hinteren Linsenpol des favorisierten Symbol und des Symbol B. Legende siehe Abb. 22.
 schwarz = Anpassungslinie und KI fav. Symbol
 grau = Anpassungslinie und KI Symbol B

Aus den Diagrammen ist ersichtlich, dass einige Werte des Symbol B außerhalb des eigenen Konfidenzintervalls, und des Konfidenzintervalls des favorisierten Symbols liegen. Diese Einzelwerte sind Probanden zuzuordnen, bei denen die Wahl der Reizsetzung eine Rolle gespielt hat.

Die Diagramme in Abb. 25 zeigen Boxplots der Standardabweichungen der Absolutwerte der Vorderkammertiefe, der Linsendicke und des posterioren Linsenpols, für das favorisierte Symbol und das Symbol B; es sind paarweise die beiden Symbole verglichen. Zusätzlich sind die Diagramme aufsteigend von 0d bis -5d zugeordnet.



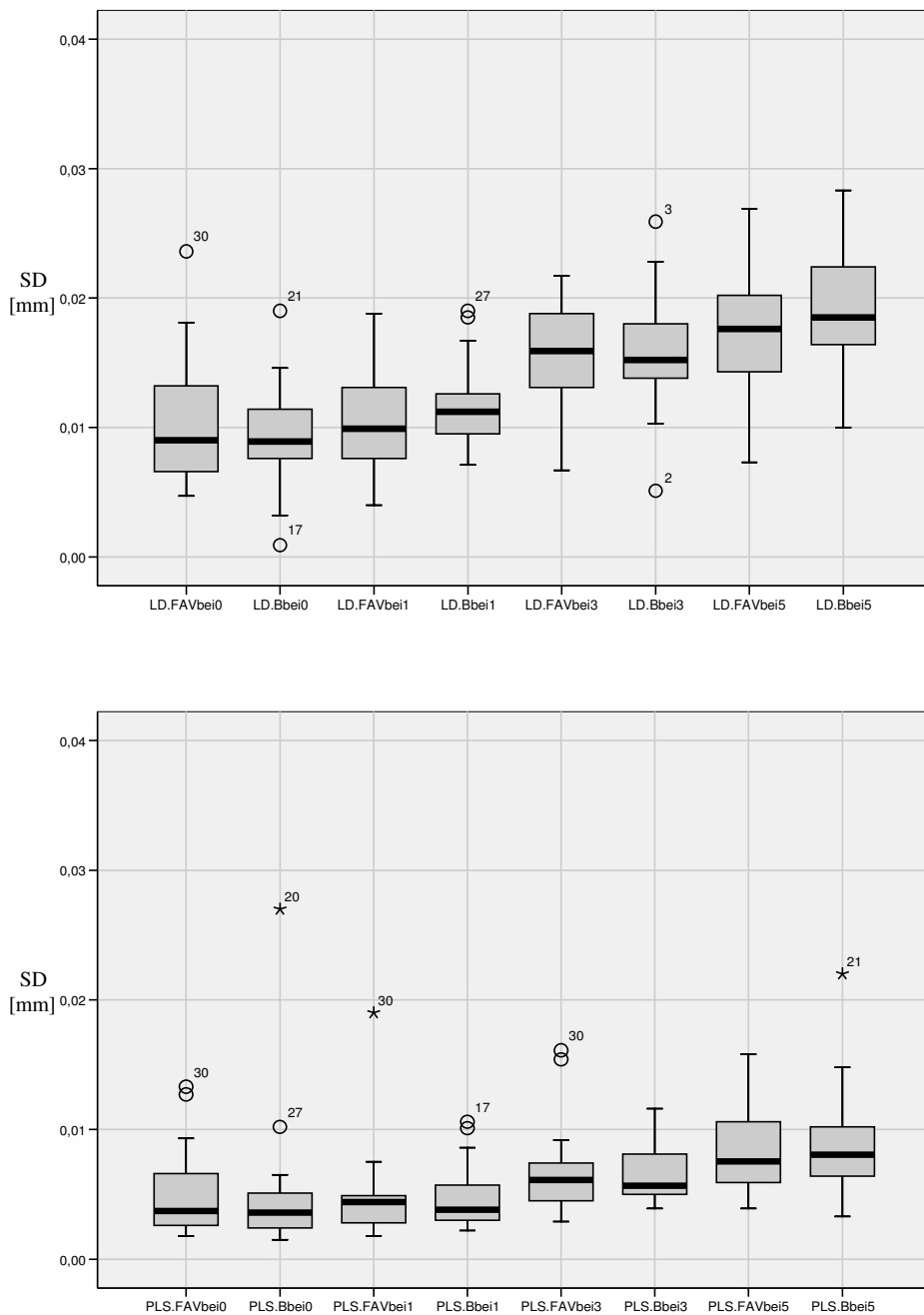


Abb. 25: Boxplots zum Vergleich der Standardabweichungen der Absolutwerte der akkommodativen Änderungen der Distanzen des okulären Vorderabschnitts für das favorisierte Symbol und das Symbol B (paarweise angeordnet).
VK: oberes Diagr.; LD: mittleres Diagr.; PLS: unteres Diagr.

Aus den Boxplots ist ersichtlich, dass die Mittelwerte sich paarweise etwa bei gleichen Werten einpendeln. Der Interquartilbereich des favorisierten Symbols ist vergrößert, die Ausreißerzahl ist beim posterioren Linsenpol erhöht. Aus den Diagrammen ist nicht ersichtlich, ob die Auswahl des Symbols eine Rolle gespielt hat.

Zusätzlich wurden die Einzelwerte der Standardabweichungen zu einem Mittelwert zusammengefasst und die dazugehörigen Konfidenzintervalle gebildet, und in Tabelle 12 zusammengefasst.

d	Messgröße	Symbol	UG	MW	OG
0	VK	Fav	0,007	0,008	0,009
		B	0,007	0,009	0,010
	LD	Fav	0,009	0,010	0,012
		B	0,008	0,010	0,011
	PLS	Fav	0,004	0,005	0,006
		B	0,003	0,005	0,006
-1	VK	Fav	0,008	0,010	0,021
		B	0,008	0,009	0,010
	LD	Fav	0,009	0,011	0,012
		B	0,011	0,012	0,013
	PLS	Fav	0,003	0,005	0,006
		B	0,004	0,005	0,005
-3	VK	Fav	0,012	0,014	0,015
		B	0,012	0,013	0,014
	LD	Fav	0,014	0,016	0,017
		B	0,014	0,016	0,017
	PLS	Fav	0,005	0,007	0,008
		B	0,006	0,007	0,007
-5	VK	Fav	0,013	0,015	0,016
		B	0,014	0,015	0,017
	LD	Fav	0,016	0,018	0,020
		B	0,017	0,019	0,021
	PLS	Fav	0,007	0,008	0,010
		B	0,007	0,009	0,010

Tab. 12: Mittelwerte der Standardabweichungen der Symbole. Alle Distanzen in mm.
 UG = Untergrenze
 MW = Mittelwerte
 OG = Obergrenze

Auch hier liegen alle Mittelwerte des favorisierten Symbols im Konfidenzintervall des Symbol B und umgekehrt ebenso (siehe Boxplots Abb. 25).

In Tabelle 13 sind die p-Werte des t-Test für den Vergleich der Standardabweichungen der Absolutwerte für das favorisierte Symbol und das Symbol B im Vergleich dargestellt, um festzustellen, ob die Unterschiede „echt“ sind.

Reiz [d]	VK	LD	PLS
0	0,455	0,537	0,776
-1	0,698	0,268	0,916
-3	0,361	0,969	0,984
-5	0,588	0,379	0,829

Tab. 13: p-Werte für das fav. Symbol und das Symbol B.

4.2.4 Symbol L: Verlauf der 30 Einzelmessungen

Der Landoltring (=Symbol L) stellt im Vergleich zu den weiteren Symbolen eine differenzierte Reizsetzung dar, da die Richtung der Öffnung des Rings nach zehn Messungen geändert wurde und so der Proband gezwungen war, sich gänzlich neu zu konzentrieren und das Symbol neu zu fixieren, um die Schärfe zu erhalten.

Bei vier Probanden konnte eine sehr hohe Anzahl (>15) guter Messungen (= Interferogramme, bei denen alle Grenzflächen optimal dargestellt werden) in den einzelnen Messzyklen festgestellt werden, so dass eine Darstellung des Zeitverlaufs der Messzyklen hier aussagekräftig ist. Von den ersten fünf und den letzten fünf Messergebnissen wurde der Mittelwert errechnet, um feststellen zu können, ob die Akkommodation nachlässt, oder konstant gehalten werden kann. Da die Konzentrationsfähigkeit erst bei -3d und -5d von Bedeutung ist, sind die Diagramme auch nur für diese beiden Messzyklen erstellt worden.

Abbildung 26 zeigt als Beispiel den Verlauf der 30 Einzelmessungen der Absolutwerte für die vorderkammertiefe bei -5d des Probanden Nr.2.

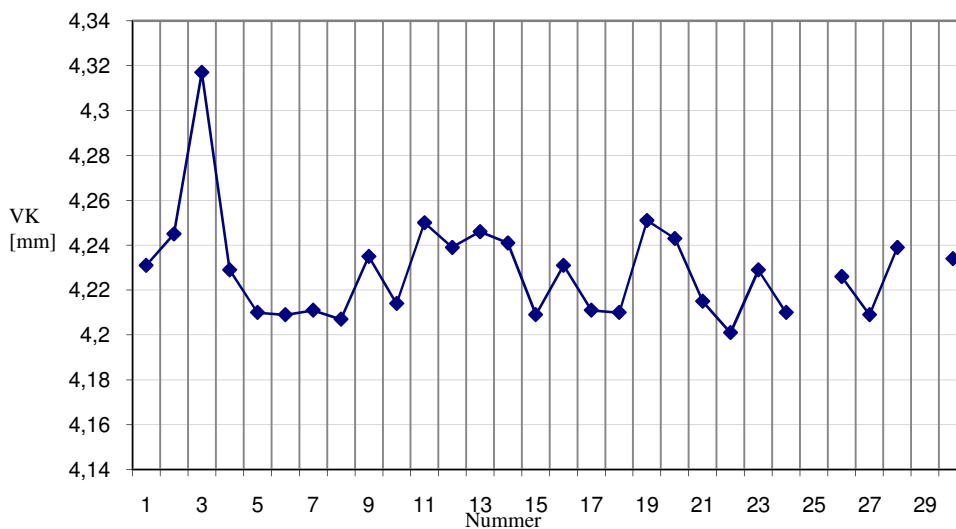


Abb. 26: Änderung der Vorderkammertiefe im Verlauf der Messreihe bei -3d für Proband 2.

Man erkennt einen relativ stabilen Akkommodationsverlauf nach anfänglichem kurzem Nachgeben der Akkommodation.

Die Diagramme in Abb. 27 zeigen die Mittelwerte der ersten fünf und der letzten fünf Messungen der Vorderkammer bei -3 und -5d der vier Probanden (P1, P2, P3, P4).

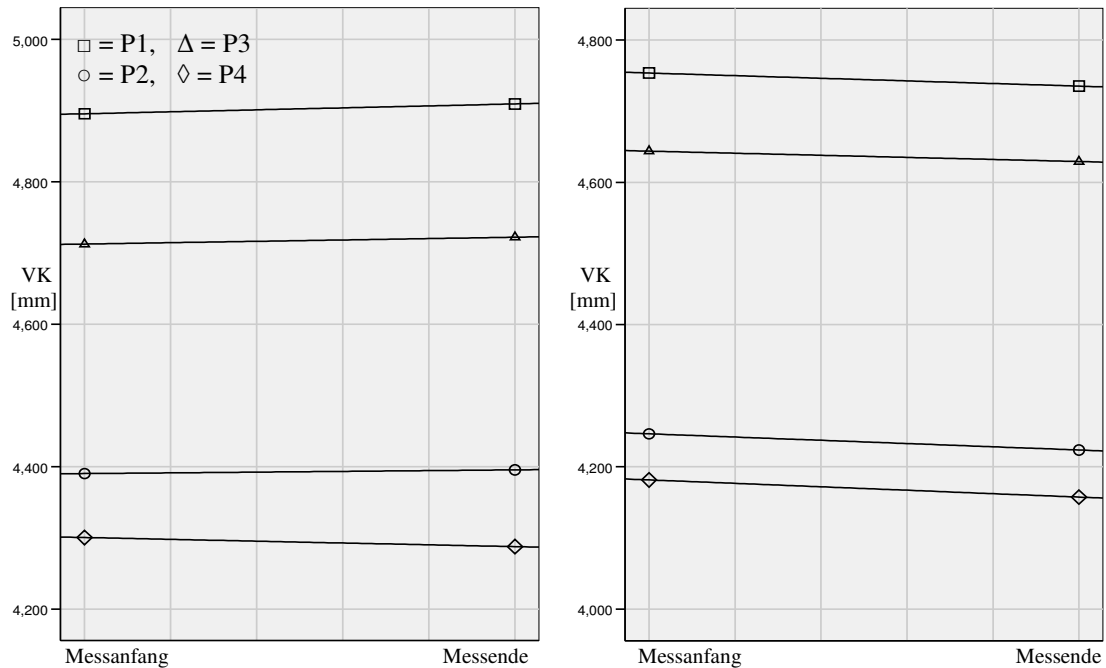


Abb. 27: Mittelwerte der ersten fünf Messungen (Messanfang) und der letzten fünf Messungen (Messende) für die Vorderkammertiefe bei -3d (linkes Diagramm) und für die vorderkammertiefe bei -5d (rechtes Diagramm) für vier Probanden (P1 = □ , P2 = ○, P3 = Δ und P4 = ◇).

Um zu ermitteln, ob sich die Mittelwerte der ersten und der letzten fünf Messungen signifikant voneinander unterscheiden, wurde ein t-Test durchgeführt. Tabelle 14 gibt die p-Werte der Vorderkammertiefenänderung an.

Messgröße [mm]	Reiz [d]	P1	P2	P3	P4
ΔVK	-3	0,046	0,607	0,200	0,320
ΔVK	-5	0,097	0,377	0,081	0,156

Tab. 14: p-Werte Vorderkammertiefenänderung zum Vergleich der ersten und der letzten fünf Messungen. Signifikante Unterschiede sind markiert.

Die Diagramme in Abb. 28 zeigen die Mittelwerte der ersten fünf und der letzten fünf Messungen der Linsendicke bei -3 und -5d für P1, P2, P3, P4 (Legende Abb. 27).

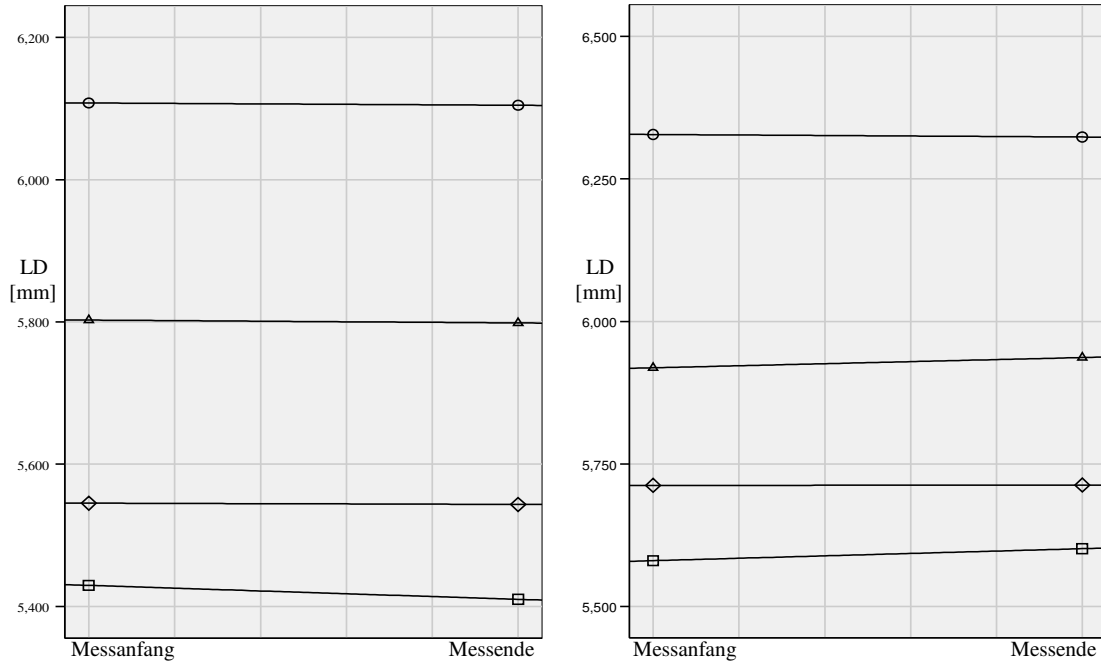


Abb. 28: Mittelwerte der ersten fünf Messungen (Messanfang) und der letzten fünf Messungen (Messende) für die Linsendicke bei -3d (linkes Diagramm) und für die Linsendicke bei -5d (rechtes Diagramm).
Legende siehe Abb. 27.

Tabelle 15 gibt die p-Werte von der Linsendickenänderung an, um zu vergleichen, ob signifikante Unterschiede zwischen den ersten fünf und den letzten fünf Messungen vorhanden sind.

Messgröße [mm]	Reiz [d]	P1	P2	P3	P4
ΔLD	-3	0,001	0,783	0,425	0,627
ΔLD	-5	0,089	0,415	0,248	0,518

Tab. 15: p-Werte der Linsendickenänderung zum Vergleich der ersten und der letzten fünf Messungen. Signifikante Unterschiede sind markiert.

Die Diagramme in Abb. 29 zeigen die Mittelwerte der ersten fünf und der letzten fünf Messungen für den posterioren Linsenpol bei -3d und -5d für P1, P2, P3, P4 (Legende Abb. 27).

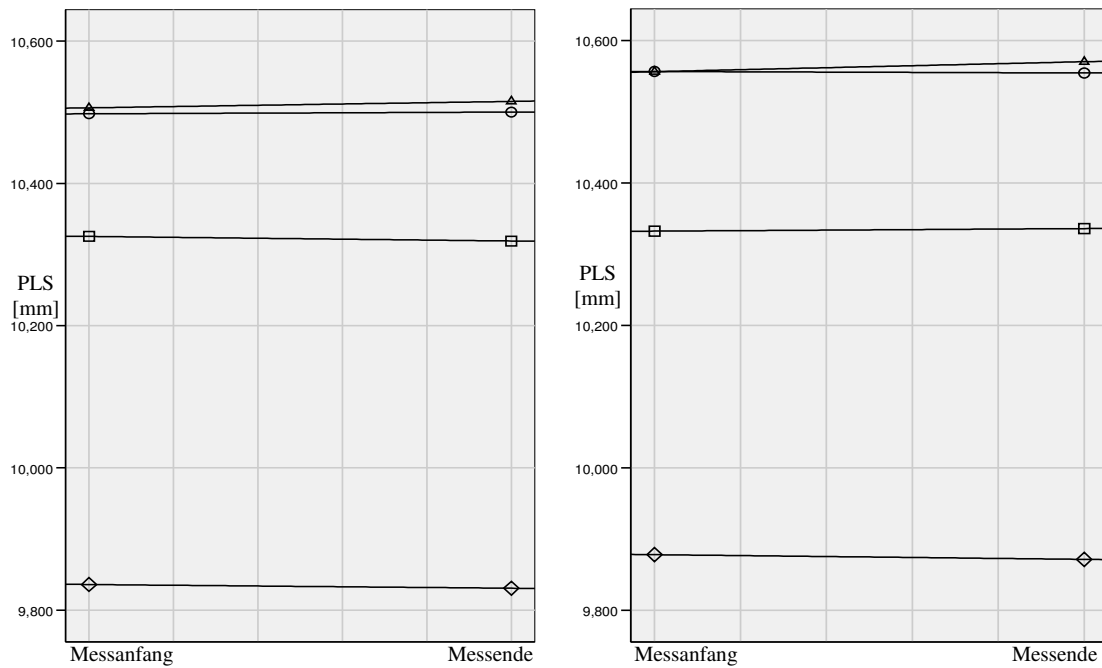


Abb. 29: Mittelwerte der ersten fünf Messungen (Messanfang) und der letzten fünf Messungen (Messende) für den posterioren Linsenpol bei -3d (linkes Diagramm) und für den posterioren Linsenpol bei -5d (rechtes Diagramm). Legende siehe Abb. 27.

Tabelle 16 gibt die p-Werte der Änderung des posterioren Linsenpols an, zum Vergleich, ob signifikante Unterschiede zwischen den ersten fünf und den letzten fünf Messungen vorhanden sind.

Messgröße [mm]	Reiz [d]	P1	P2	P3	P4
Δ PLS	-3	0,017	0,294	0,185	0,056
Δ PLS	-5	0,316	0,785	0,019	0,083

Tab. 16: p-Werte der Änderung des posterioren Linsenpols zum Vergleich der ersten und der letzten fünf Messungen. Signifikante Unterschiede sind markiert.

Bei Betrachtung der einzelnen Diagramme und Tabellen kann keine Regelmäßigkeit festgestellt werden, bezüglich der Konstanz der Akkommodation während der Messzyklen. Bei einigen Messzyklen kommt es zu signifikanten Unterschieden der Mittelwerte, bei anderen wiederum nicht, so dass hier auch keine Regelmäßigkeit vorhanden ist. Weder kann gesagt werden, dass stets bei einem Probanden signifikante Unterschiede auftreten, noch ist eine Konstanz in Bezug auf die Stärke des Akkommodationsreizes festzustellen. Geschlechtliche Unterschiede sind auch nicht festzustellen.

4.2.5 Zeitverlauf der Einzelmessungen für alle Symbole

Von Interesse ist auch, bei allen fünf Symbolen den Zeitverlauf der dreißig Einzelmessungen zu untersuchen. Auch hier wurden bei -3 und -5d die Mittelwerte der ersten fünf und der letzten fünf Messungen errechnet, um festzustellen, ob akkommodationsbedingte Änderungen deutlich außerhalb der Standardabweichungen auftraten.

Bei einer Probandin ließ sich feststellen, dass die Anzahl „guter“ Interferogramme (siehe Abb. 26) bei den einzelnen Messzyklen gegenüber denen der restlichen Probanden erhöht waren. Daher eignete sich diese Probandin gut für die folgende Auswertung. Die Probandin favorisierte das Symbol L, am Unangenehmsten war ihr das Symbol B.

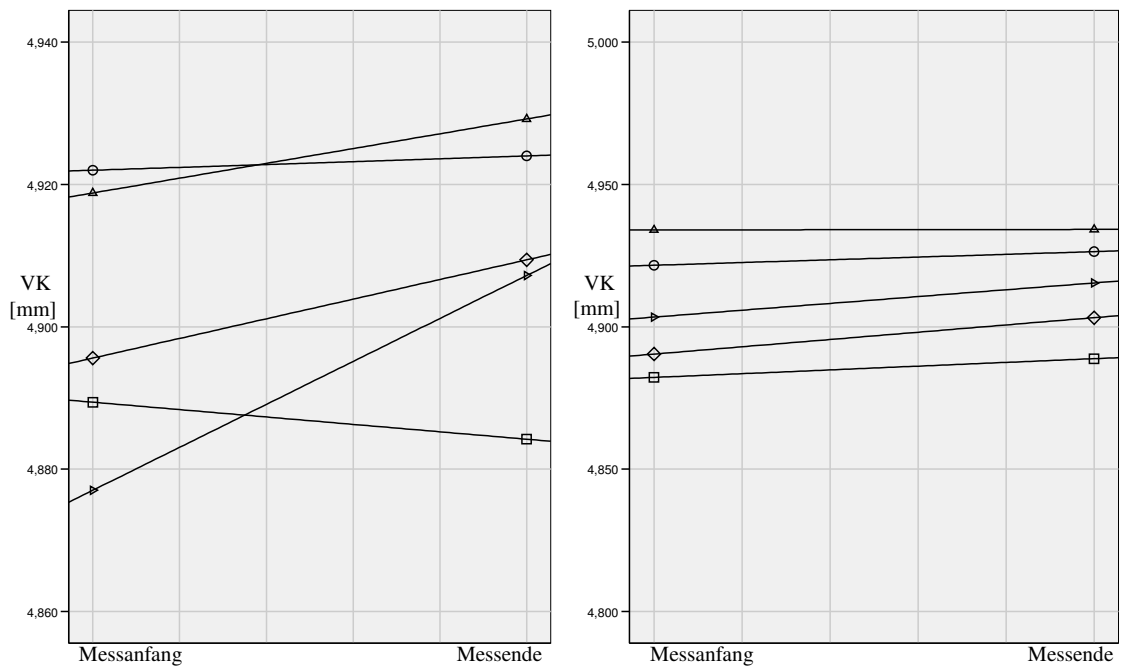
In Tabelle 17 werden die Anzahl „guter“ Interferogramme in Prozent angegeben, die bei den 30 Einzelmessungen im Durchschnitt bei der Probandin erzielt wurden.

Reiz [d]	HD	VK	LD	PLS
-3	98,7	83,3	70,6	78,7
-5	99,3	86,7	65,3	71,7

Tab. 17: Durchschnitt guter Interferogramme bei 30 Einzelmessungen.
Angabe in %.

In den folgenden Diagrammen werden die Änderungen der Akkommodation während einer Messreihe dargestellt.

Die Diagramme in Abb. 30 zeigen für diese Probandin die Mittelwerte der ersten fünf und der letzten fünf Messungen der Vorderkammertiefe, (für das rechte und das linke Auge getrennt) bei -3 und -5d für alle fünf Symbole.



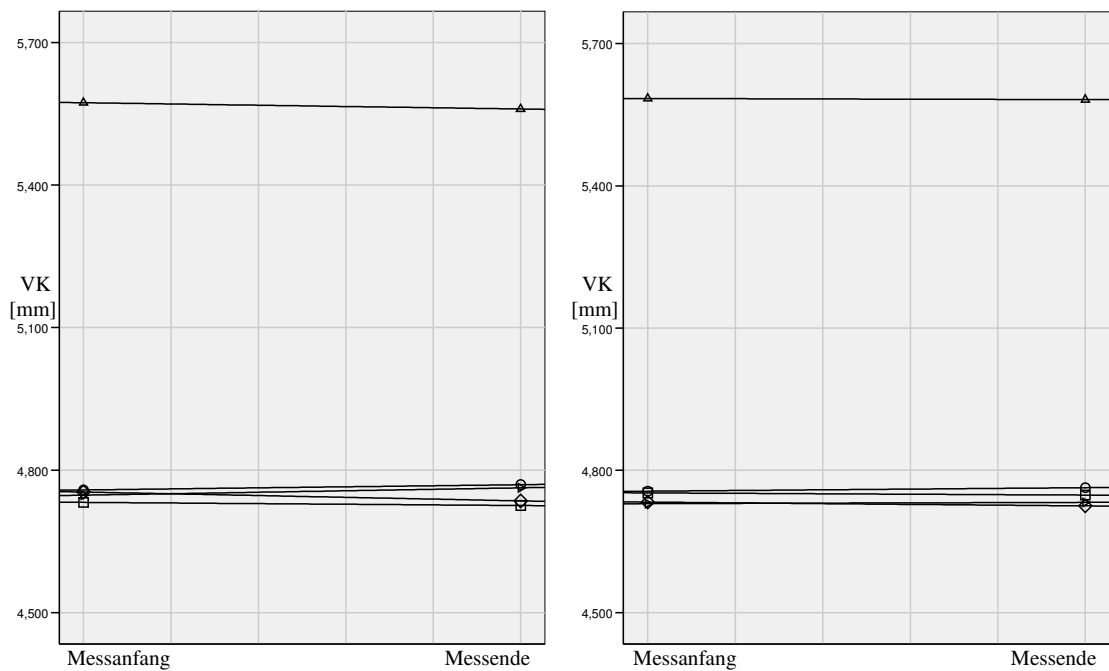


Abb. 30: Mittelwerte der ersten fünf Messungen (Messanfang) und der letzten fünf Messungen (Messende) für die Vorderkammertiefe.
 obere Diagr.reihe: VK -3d; untere Diagr.reihe: VK -5d
 linke Diagr.reihe: rechtes Auge, rechte Diagr.reihe: linkes Auge
 Legende siehe Abb. 16.

Auch hier wurde mittels t-Test ermittelt, ob signifikante Unterschiede zwischen den ersten fünf und den letzten fünf Messungen bestehen.

Tabelle 18 zeigt die p-Werte für den Vergleich der ersten fünf und der letzten fünf Messungen für die Vorderkammertiefenänderung.

Änderung [mm]	Auge	Reiz [d]	Symbol				
			X	P	B	L	E
Δ VK	re	-3	0,496	0,733	0,154	0,046	0,024
Δ VK	li	-3	0,184	0,271	0,980	0,081	0,149
Δ VK	re	-5	0,353	0,005	0,027	0,046	0,143
Δ VK	li	-5	0,234	0,234	0,555	0,081	0,672

Tab. 18: p-Werte für den Rechts-Links-Vergleich der ersten und letzten fünf Einzelmessungen der Vorderkammertiefenänderung bei Reizstärken von -3 und -5d. Signifikante Unterschiede sind markiert.

Die Diagramme in Abb. 31 stellen dies graphisch für die Linsendicke dar.

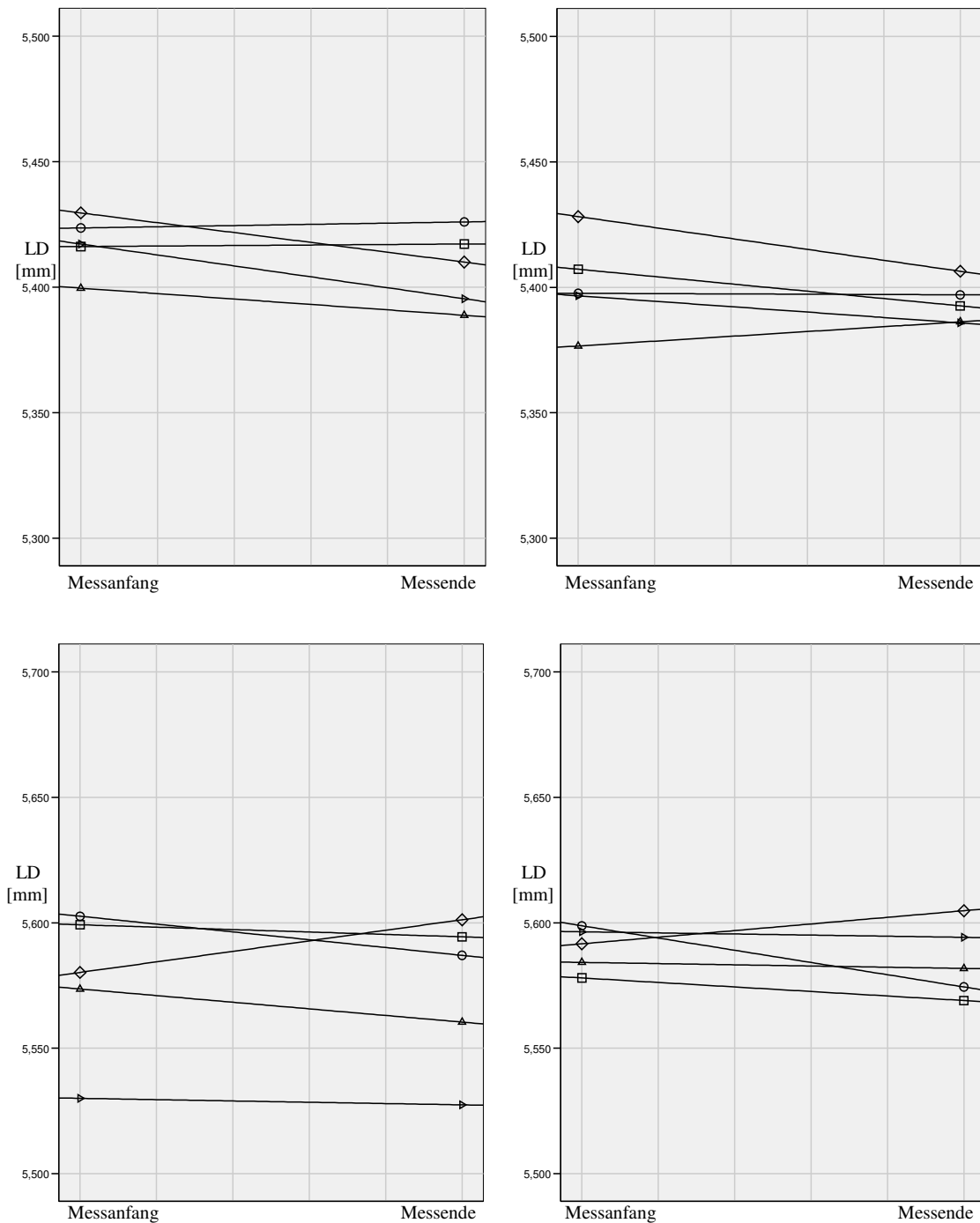


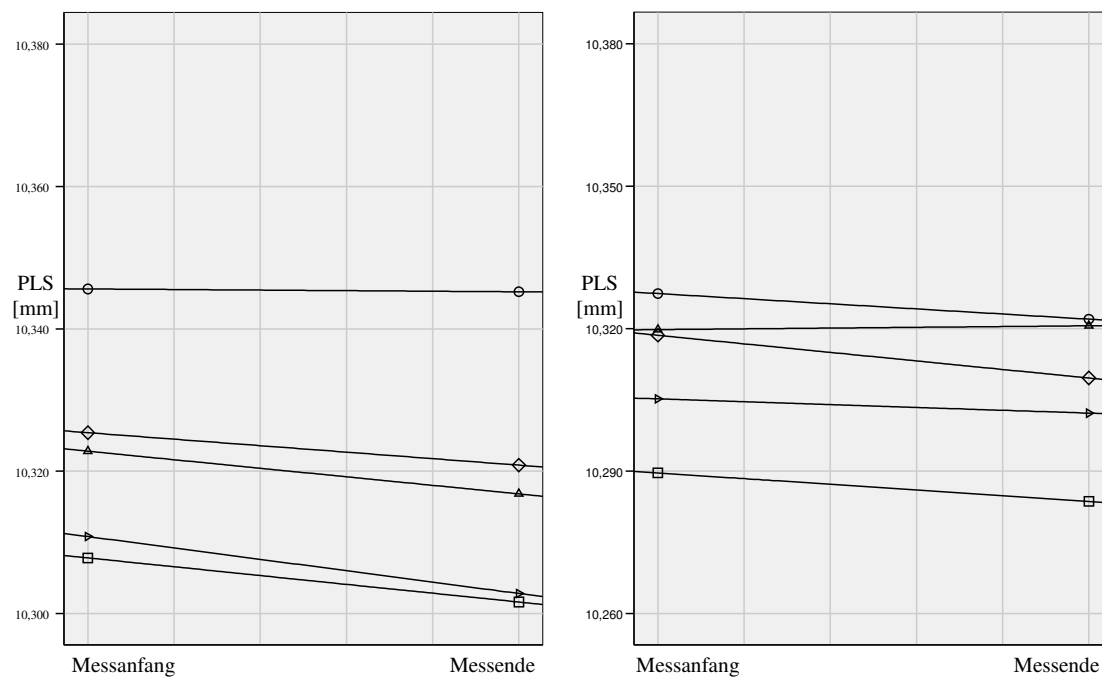
Abb. 31: Mittelwerte der ersten fünf Messungen (Messanfang) und der letzten fünf Messungen (Messende) für die Linsendicke.
 obere Diagr.reihe: LD -3d; untere Diagr.reihe: LD -5d
 linke Diagr.reihe: rechtes Auge, rechte Diagr.reihe: linkes Auge
 Legende siehe Abb. 16.

Tabelle 19 zeigt die p-Werte für den Vergleich der ersten und der letzten fünf Messungen für die Linsendickenänderung.

Änderung [mm]	Auge	Reiz [d]	Symbol				
			X	P	B	L	E
Δ LD	re	-3	0,834	0,784	0,261	0,001	0,215
Δ LD	li	-3	0,208	0,936	0,156	0,028	0,244
Δ LD	re	-5	0,599	0,064	0,394	0,086	0,724
Δ LD	li	-5	0,116	0,026	0,843	0,166	0,672

Tab. 19: p-Werte der Linsendickenänderung zum Vergleich der ersten und der letzten fünf Messungen. Signifikante Unterschiede sind markiert.

Die Diagramme in Abb. 32 stellen dies graphisch für den posterioren Linsenpol dar.



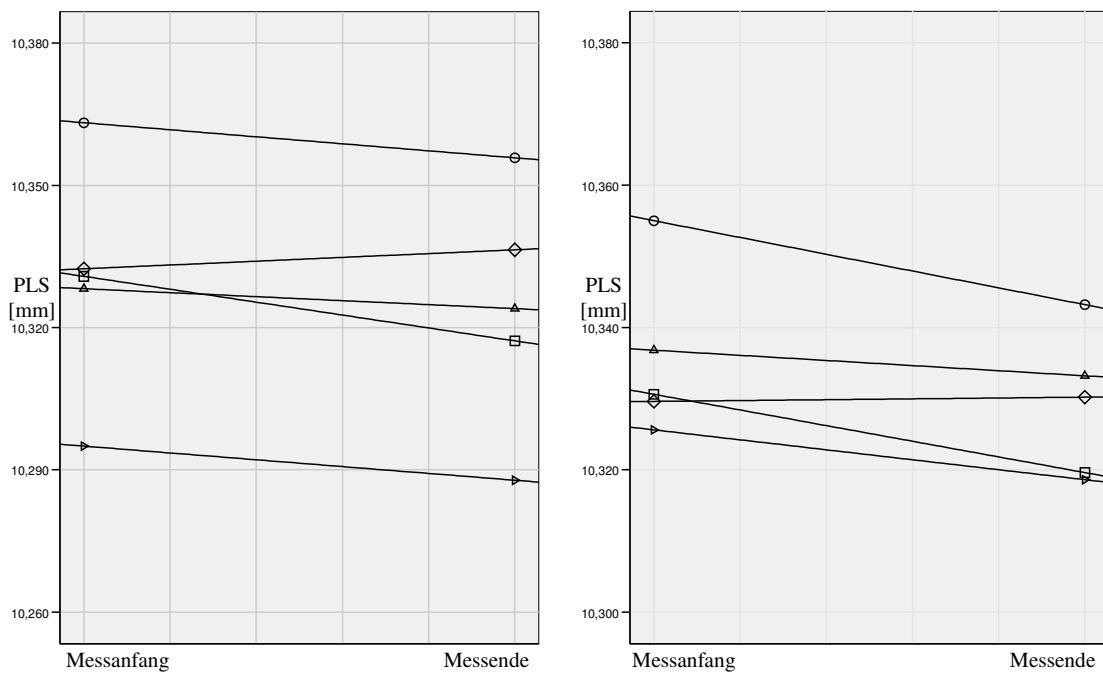


Abb. 32: Mittelwerte der ersten fünf Messungen (Messanfang) und der letzten fünf Messungen (Messende) für den posterioren Linsenpol.
 obere Diagr.reihe: PLS -3d; untere Diagr.reihe: PLS -5d
 linke Diagr.reihe: rechtes Auge, rechte Diagr.reihe: linkes Auge
 Legende siehe Abb. 16.

Tabelle 20 zeigt die p-Werte für den Vergleich der ersten und der letzten fünf Messungen für die Änderung des posterioren Linsenpols.

Änderung [mm]	Auge	Reiz [mm]	Symbol				
			X	P	B	L	E
Δ PLS	re	-3	0,030	0,825	0,147	0,088	0,136
Δ PLS	li	-3	0,154	0,130	0,614	0,003	0,376
Δ PLS	re	-5	0,051	0,090	0,260	0,314	0,034
Δ PLS	li	-5	0,001	0,023	0,286	0,753	0,015

Tab. 20: p-Werte der Änderungen des posterioren Linsenpols zum Vergleich der ersten und der letzten fünf Messungen. Signifikante Unterschiede sind markiert.

4.2.6 Reproduzierbarkeit

Um feststellen zu können, ob sich die Messungen und die Ergebnisse jederzeit wiederholen lassen, wurden vier Probanden in einem Abstand von ca.12 Monaten erneut unter gleichen Bedingungen vermessen. Hierbei wurden die Änderungen ΔHD , ΔVK , ΔLD und ΔPLS lediglich für die Symbole X, P und B gemessen und miteinander verglichen.

Die Diagramme in Abb.33 zeigen die Mittelwerte für die Hornhautdickenänderung der vier Probanden für die drei Symbole der 1.Messreihe und der 2.Messreihe.

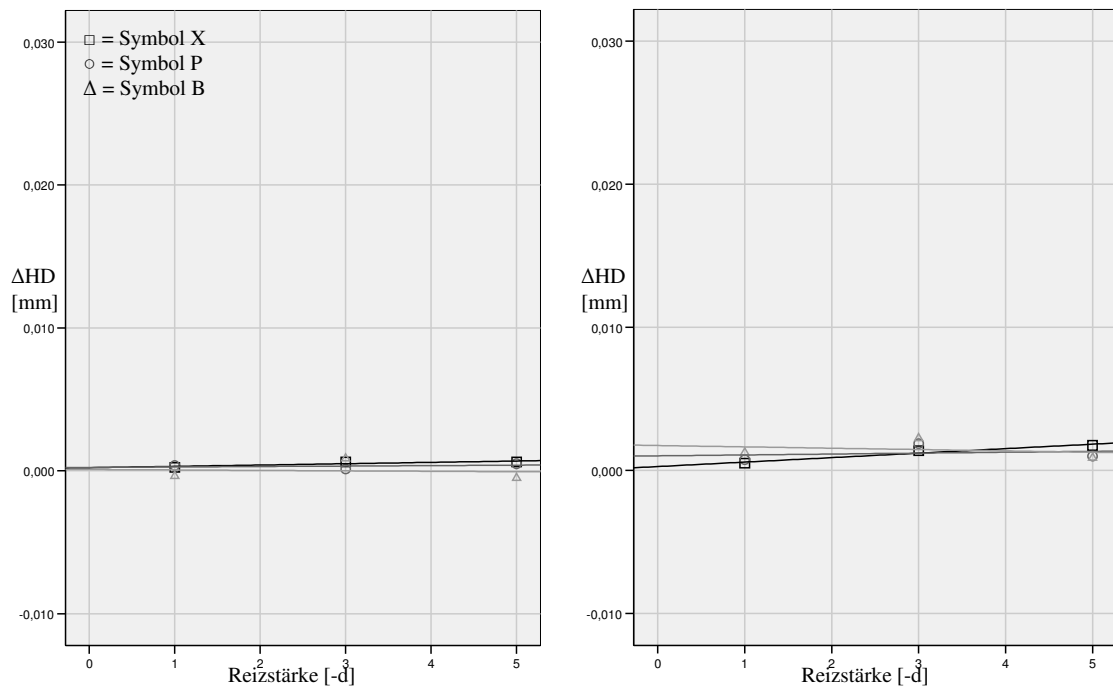


Abb. 33: Mittelwerte der Distanzänderungen für die Hornhautdickenänderung für verschiedene Reizstärken und Symbole; linkes Diagr.: 1.Messreihe; rechtes Diagr.: 2.Messreihe

Tabelle 21 gibt die Mittelwerte mit dazugehörigen Konfidenzintervallen, für die Hornhautdickenänderung bei einer Reizstärke von -5d wieder, da hier die größten Änderungen stattfanden. (Im Interesse der Übersichtlichkeit wurde darauf verzichtet das Konfidenzintervall graphisch in den Diagrammen darzustellen).

Messgröße	Symbol	Messreihe	UG	MW	OG
ΔHD	X	1	0,000	0,001	0,002
	X	2	-0,001	0,002	0,004
	P	1	-0,001	0,001	0,002
	P	2	-0,001	0,001	0,003
	B	1	0,000	0,001	0,001
	B	2	-0,001	0,001	0,003

Tab. 21: Mittelwerte der 1.Messreihe und der 2.Messreihe für die Hornhautdickenänderung bei $-5d$. Alle Distanzen in mm.

UG = Untergrenze

MW = Mittelwerte

OG = Obergrenze

Aus der Tabelle geht hervor, dass für die Hornhautdickenänderung bei $-5d$ die erste Messreihe im Konfidenzintervall der zweiten Messreihe liegt und umgekehrt genauso.

Die Diagramme in Abb.34 zeigen die Mittelwerte für die Vorderkammertiefenänderung der vier Probanden für die drei Symbole der 1.Messreihe und der 2.Messreihe.

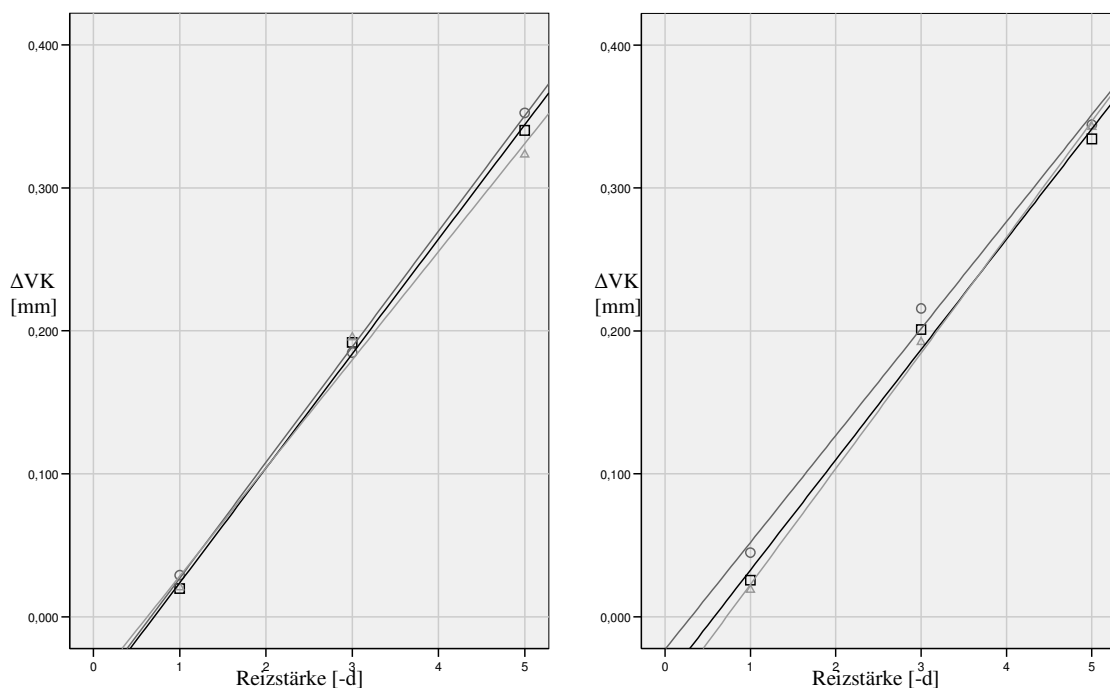


Abb. 34: Mittelwerte der Distanzänderungen für die Vorderkammertiefenänderung für verschiedene Reizstärken und Symbole; linkes Diagr.: 1.Messreihe; rechtes Diagr.: 2.Messreihe.Legende: siehe Abb. 16.

Tabelle 22 gibt die Mittelwerte mit dazugehörigem Konfidenzintervall für die Vorderkammertiefenänderung bei einer Reizstärke von -5d wieder.

Messgröße	Symbol	Messreihe	UG	MW	OG
ΔVK	X	1	0,296	0,340	0,384
	X	2	0,249	0,334	0,419
	P	1	0,272	0,352	0,433
	P	2	0,258	0,344	0,430
	B	1	0,235	0,323	0,411
	B	2	0,266	0,343	0,419

Tab. 22: Mittelwerte der 1.Messreihe und der 2.Messreihe für die Vorderkammertiefenänderung bei -5d. Alle Distanzen in mm.
 UG = Untergrenze
 MW = Mittelwerte
 OG = Obergrenze

Aus der Tabelle geht ebenfalls hervor, dass für die Vorderkammertiefenänderung die erste Messreihe im Konfidenzintervall der zweiten Messreihe liegt und umgekehrt genauso.

Die Diagramme in Abb.35 zeigen die Mittelwerte für die Linsendickenänderung der vier Probanden für die drei Symbole der 1.Messreihe und der 2.Messreihe.

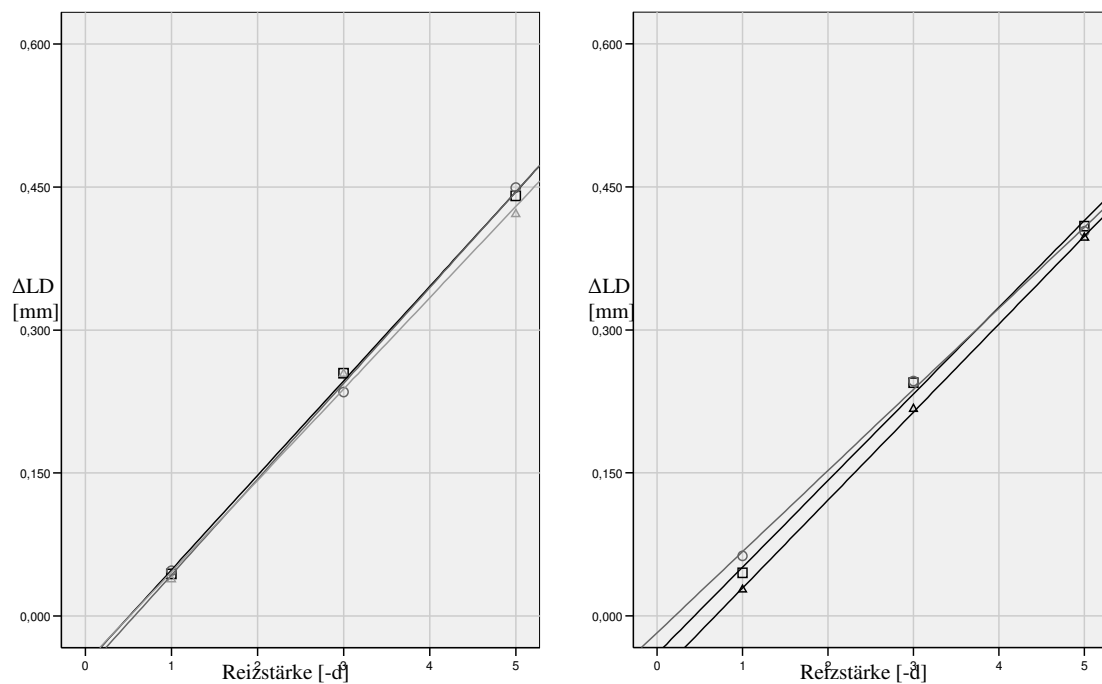


Abb. 35: Mittelwerte der Distanzänderungen für die Linsendickenänderung für verschiedene Reizstärken und Symbole; linkes Diagr.: 1.Messreihe; rechtes Diagr.: 2.Messreihe. Legende: siehe Abb. 16.

Tabelle 23 gibt die Mittelwerte mit dazugehörigem Konfidenzintervall für die Linsendickenänderung bei -5d wieder.

Messgröße	Symbol	Messreihe	UG	MW	OG
ΔLD	X	1	0,408	0,441	0,473
	X	2	0,323	0,409	0,495
	P	1	0,384	0,449	0,515
	P	2	0,309	0,403	0,497
	B	1	0,348	0,422	0,495
	B	2	0,325	0,397	0,468

Tab. 23: Mittelwerte der 1.Messreihe und der 2.Messreihe für die Linsendickenänderung bei -5d. Alle Distanzen in mm.
 UG = Untergrenze
 MW = Mittelwerte
 OG = Obergrenze

Aus der Tabelle geht hervor, dass auch für Linsendickenänderung die erste Messreihe im Konfidenzintervall der zweiten liegt und umgekehrt genauso.

Die Diagramme in Abb. 36 zeigen die Mittelwerte für die Änderung der Position des posterioren Linsenspols der vier Probanden für die drei Symbole der 1.Messreihe und der 2.Messreihe.

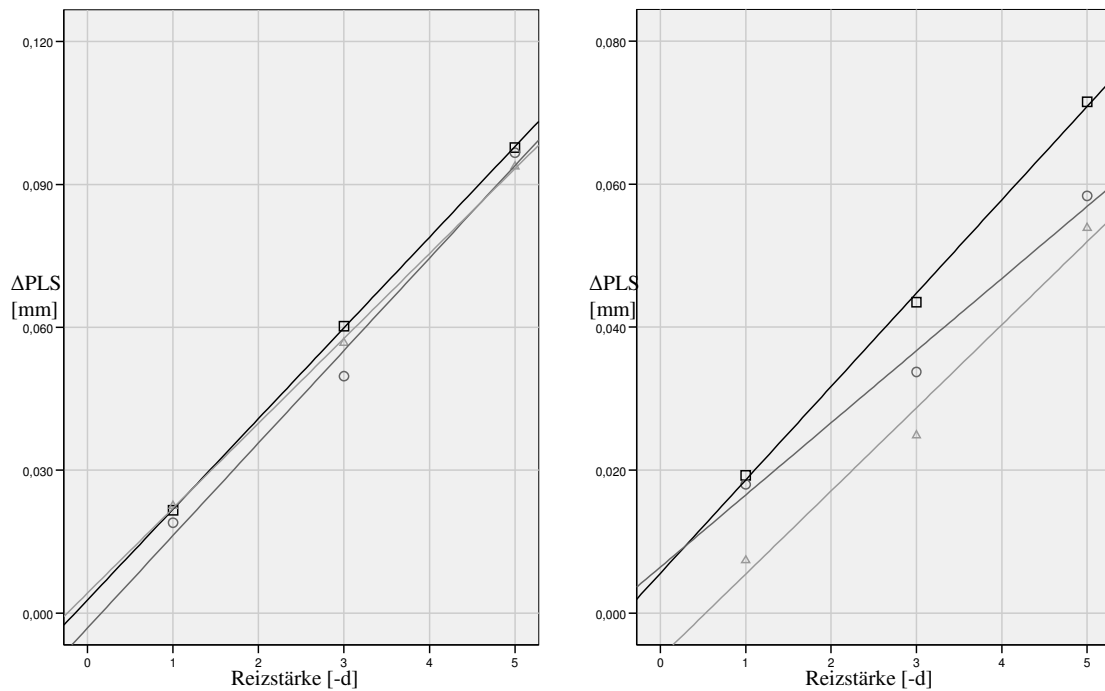


Abb. 36: Mittelwerte der Distanzänderungen für die Änderung der Position des posterioren Linsenspols für verschiedene Reizstärken und Symbole; linkes Diagr.: 1.Messreihe; rechtes Diagr.: 2.Messreihe. Legende: siehe Abb. 16.

Tabelle 24 gibt die Mittelwerte und Konfidenzintervalle für die Änderung der Position des posterioren Linsenspols bei -5d wieder.

Messgröße	Symbol	Messreihe	UG	MW	OG
Δ PLS	X	1	0,080	0,098	0,115
	X	2	0,058	0,072	0,085
	P	1	0,063	0,097	0,130
	P	2	0,041	0,058	0,076
	B	1	0,067	0,094	0,120
	B	2	0,029	0,054	0,079

Tab. 24: Mittelwerte der 1.Messreihe und der 2.Messreihe für die Änderung der Position des posterioren Linsenspols bei -5d. Alle Distanzen in mm.
 UG = Untergrenze
 MW = Mittelwerte
 OG = Obergrenze

Aus Tabelle 24 ist ersichtlich, dass für die Änderung der Position des posterioren Linsenpols bei allen Symbolen die erste Messreihe nicht im Konfidenzintervall der zweiten liegt und umgekehrt genauso.

Um zu ermitteln, ob signifikante Unterschiede zwischen der ersten und der zweiten Messreihe besteht, wurde ein t-Test durchgeführt.

Die Tabelle 25 stellt die p-Werte dar.

Symbol	X	P	B
ΔVK	0,887	0,871	0,699
ΔLD	0,423	0,358	0,573
ΔPLS	0,014	0,031	0,022

Tab. 25: p-Werte der Vorderkammertiefenänderung, der Linsendickenänderung und der Änderung der Position des posterioren Linsenpols. Vergleich der Mittelwerte der ersten und der letzten fünf Messungen der Symbole X, P und B. Signifikante Unterschiede sind markiert.

Aus Tabelle 25 geht hervor, dass sich die Änderungen der Position des posterioren Linsenpols der ersten fünf Messungen von denen der letzten fünf Messungen signifikant unterscheiden.

5 Diskussion

Ziel dieses Kapitels ist es, die Ergebnisse und die Gestaltung der Untersuchungen zu erörtern. Ein Vergleich mit bisher in der Literatur beschriebenen Ergebnissen gestaltet sich schwierig. Es sind zwar Messmethoden beschrieben worden, mit denen die Reizsetzung untersucht wurde, aber nicht mittels Laser-Interferenz-Biometrie wie mit dem ACMaster. Die Messmethoden variieren insofern, als monokulare Untersuchungen von binokularen unterschieden werden können; ebenso kann zwischen statischer und dynamischer Akkommodation unterschieden werden. Zusätzlich kann eine Differenzierung zwischen älteren und jüngeren Probandengruppen vorgenommen werden.

Die Messung von akkommodativen Änderungen unter verschiedener Reizsetzung wurde in der Literatur von mehreren Autoren beschrieben (Fincham 1951, Campbell 1954, Philips & Stark 1977, Kruger & Pola 1986). Bei den älteren wissenschaftlichen Arbeiten wurde eine Linse mit definierter Stärke vor das Auge gesetzt und dann auf die Reaktion des Probanden gewartet, bis er angab, den hinter der Linse befindlichen Gegenstand scharf zu sehen (Fincham 1951).

In den meisten Arbeiten wurde nachgewiesen, dass die Unschärfe als Akkommodationsreiz ausreicht. Fincham diskutierte als Erster die Frage, ob verschwommene Bilder die Akkommodation auslösen. Die Unschärfe als Reiz wurde ebenso von Carter (1962), von Stark und Takahashi (1965) und von Troelstra et al. (1964) verwendet, die die Schlussfolgerung zogen, dass einstellbare Unschärfe der effektivste Reiz für die Akkommodation ist. Die Rolle der Größe des Zielobjekts und die augenscheinliche Distanz als Reizauslöser für die Akkommodation werden kontrovers diskutiert. Ittelson und Ames (1950) fanden heraus, dass die Größenänderungen des zu fokussierenden Bildes, die daraus resultieren, dass die scheinbare Distanz verändert wurde, als Akkommodationsreiz dienen können. Campbell und Westheimer (1960) stellten fest, dass, wenn Größe und Unschärfe in ein Bild projiziert werden und somit ein Konflikt im Auge entsteht, die scheinbare Größenänderung sich über den anderen Reiz hinwegsetzt (Kruger & Pola 1986). Andere Studien wiederum kamen zu dem Schluss, dass Größenänderungen kein

Akkommodationsreiz sind (z.B. Alpern 1958 & Morgan 1968). Alpern entdeckte 1955, dass, wenn die Größe verändert wurde und der dioptrische Reiz der gleiche blieb, keine Akkommodation stattfand.

Weitere Arbeiten belegen, dass andere Einflüsse, wie Helligkeit, Vergenz und die chromatische Aberration eine Rolle spielen (Campbell & Westheimer 1960).

Bei den neueren Untersuchungen wurden die Akkommodation und deren Reizauslösung mittels Ultraschallgeräten untersucht (Beers & v.d. Heijde 1996), was genauere Aussagen über akkommodative Änderungen ermöglichte.

Die Untersuchung mittels Laser-Interferenz-Biometrie erlaubt eine Messgenauigkeit im zweistelligen μm -Bereich. Durch das kontaktlose Messverfahren kann auf die Applikation von Lokalanästhetika verzichtet werden, so dass ein großer Vorteil dem Patienten gegenüber entsteht. Durch Abdecken des nicht zu untersuchenden Auges wird die Ablenkung durch äußere Einflüsse minimiert und der Patient kann sich maximal konzentrieren. Wie bei den anderen Messverfahren, ist der Untersucher auf die Mithilfe des Patienten angewiesen, da dieser angeben muss, wann er das im Gerät dargestellte Symbol scharf sieht. Auch der Untersucher sollte über eine gewisse manuelle Geschicklichkeit verfügen, um die beiden Reflexe bei der Messung optimal überlagern zu können. Nachteil der monokulären Akkommodation ist, dass diese im Vergleich zur binokulären niedriger ist (Duane 1922).

Bei der Auswahl der Symbole wurden Größenunterschiede berücksichtigt (Kreuz und Punkt), Bewegungen während der Messreihen wurden eingefügt (blinkendes Kreuz und Landoltring) und beim Symbol E wurde die Schärfeeinstellung im Hintergrund verändert, während das E schwarz blieb. Die Symbole wurden mehrfarbig dargestellt (grüne, rote, blaue Pixel), denn durch die unterschiedliche Wellenlänge des Lichts können Akkommodationsunterschiede von ca. 1d entstehen (Fincham 1951). Die Probanden mussten die Symbole im Ganzen fixieren, so dass dieser Effekt vermieden wird. Trotzdem kann nicht ausgeschlossen werden, dass einzelne Probanden nur ein Pixel zur Fixation ausgesucht haben.

5.1 Summenauswertung

Zu Beginn ging es darum festzustellen, ob die Änderungen ΔHD , ΔVK , ΔLD und ΔPLS bei allen fünf Symbolen gleich sind, oder ob signifikante Unterschiede bestehen. In Tabelle 1 wurden die Änderungen der Mittelwerte (in optischer Weglänge) aller Symbole und Augen zusammengefasst. Die Linsendicke änderte sich bei -1d um 0,037mm, bei -3d um 0,210mm und bei -5d um 0,378mm, entsprechend 0,037mm/d, 0,070mm/d und 0,076mm/d, bzw. einem Mittelwert von 0,061mm/d. Umgerechnet in geometrische Weglänge ergibt sich eine mittlere Änderung von 0,044mm/d. Dieses Ergebnis weicht leicht von dem Wert von 0,056mm/d ab, den van der Heijde (1996) bei seinen Ultraschallmessungen für die Linsendickenzunahme ermittelte. Diese Abweichung liegt allerdings im Bereich der Standardabweichung.

Die Vorderkammertiefe änderte sich im Mittel um 0,036mm/d (hier: geometrische Weglänge). Auch dieser Wert weicht leicht von dem Ergebnis der Ultraschallmessungen von Dubbelman (2005) ab, der für die Vorderkammertiefenänderung 0,048mm/d ermittelte. Diese Abweichung liegt ebenfalls im Bereich der Standardabweichung.

Der posteriore Linsenpol änderte sich um 0,009mm/d (hier: geometrische Weglänge). Dieser Wert steht in sehr guter Übereinstimmung mit dem von Dubbelman (2005) ermittelten Ergebnis von 0,008mm/d.

Bei dem Vergleich der Änderungen der Mittelwerte aller Symbole von 0 zu -1d, 0 zu -3d und 0 zu -5d wurde festgestellt, dass sich die Mittelwerte für ein Symbol jeweils innerhalb der Standardabweichungen der anderen Symbole befanden.

Da bei -5d die größten Änderungen festzustellen waren, wurden die Mittelwerte und dazugehörigen Konfidenzintervalle verglichen. Bei der Hornhautdickenänderung (ΔHD) lagen die Mittelwerte der Symbole P, L und E nicht im Konfidenzintervall des Symbol X, umgekehrt ebenso. Da diese Werte jedoch im Bereich von 0-2 μ m liegen, im Vergleich dazu eine relativ große Standardabweichung besitzen (vgl. oberes Diagramm in Abb.17), müssen hier größere Schwankungen angenommen werden. Bei der Vorderkammertiefenänderung (ΔVK) lag der Mittelwert des Symbol B nicht in den Konfidenzintervallen der Symbole X und L. Bei der Linsendickenänderung (ΔLD) lag der Mittelwert des Symbol B wiederum nicht im Konfidenzintervall des Symbol X.

Symbol B hatte mit Abstand den kleinsten Mittelwert, d.h., dass die Akkommodation hier am Geringsten war. Bei der Änderung der Position des posterioren Linsenpols (Δ PLS) bildete Symbol E eine Ausnahme, dessen Mittelwert nicht in den Konfidenzintervallen der Symbole X und P lag und umgekehrt genauso. Bei Symbol E war die Änderung am Kleinsten.

Boxplots der Linsendickenänderung bei -5d zeigen, dass Symbol L den kleinsten Interquartilbereich. Daraus könnte das Fazit gezogen werden, dass dieses Symbol relativ genaue Messungen erlaubt.

Im Vergleich der Ergebnisse bei männlichen und weiblichen Probanden konnte festgestellt werden, dass die Änderungen zwischen 0, -1, -3 und -5d der männlichen Probanden innerhalb der Standardabweichungen der weiblichen Probanden lagen und umgekehrt genauso. Die Mittelwerte mit dazugehörigen Konfidenzintervallen wurden wiederum nur für -5d gebildet. Bei der Vorderkammertiefenänderung stellte Symbol E eine Ausnahme dar, bei der Linsendickenänderung die Symbole P und B und bei der Änderung der Position des posterioren Linsenpols das Symbol X. Der t-Test ergab jedoch keine signifikanten Unterschiede, so dass hier davon auszugehen ist, dass es sich um Ausnahmen handelt, da keine Regelmäßigkeit bezüglich eines Symbols festzustellen ist.

Im Vergleich zwischen männlichen und weiblichen Probanden hat der Akkommodationsreiz keinen Einfluss auf Änderungen von Distanzen im okularen Vorderabschnitt. Dieses Ergebnis korreliert mit dem Ergebnis von Duane, der schon 1922 feststellte, dass keine akkommodativen Unterschiede zwischen Frauen und Männern vorhanden sind.

Bei der Untersuchung tendenziell hyperoper Probanden lagen die Mittelwerte für ein Symbol jeweils in den Konfidenzintervallen der anderen Symbole. Beim t-Test konnten keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden.

Bei den tendenziell myopen Probanden bildeten die Symbole P und B bei der Vorderkammertiefen- und der Linsendickenänderung Ausnahmen, da die Mittelwerte viel kleiner waren, als die der anderen Symbole (vgl. Tab. 5). Bei diesen beiden Symbolen akkommodierten die Probanden weniger. Im t-Test zeigten sich signifikante

Unterschiede für die Symbole P und B bei der Vorderkammertiefen- und der Linsendickenänderung.

Symbol X stellte bei der Änderung der Position des posterioren Linsenpols eine Ausnahme dar, im t-Test war jedoch keine signifikante Änderung festzustellen.

Insgesamt lässt sich hier die Schlussfolgerung ziehen, dass bei den Symbolen P, B und E die Akkommodationsänderungen etwas geringer sind, sie somit als Akkommodationsreiz eher ungeeignet erscheinen.

5.2 Vergleich der Standardabweichungen der Absolutwerte

Im folgenden Abschnitt soll festgestellt werden, ob Unterschiede bezüglich der Standardabweichungen der Messwerte für die verschiedenen Symbole bestanden. Ziel war es herauszufinden, ob durch eine verkleinerte Standardabweichung sich ein Symbol besser eignete, als ein anderes; oder ob durch eine vergrößerte Standardabweichung im Vergleich zu den anderen, ein Symbol besonders ungeeignet war.

Bei allen fünf Symbolen war gleichermaßen festzustellen, dass mit steigender Reizstärke auch die Standardabweichung zunahm.

Bei einer Reizstärke von -5d lagen die Mittelwerte für die Hornhautdicken- und die Linsendickenänderung für ein Symbol innerhalb der Konfidenzintervalle der anderen Symbole. Bei der Vorderkammertiefenänderung(ΔVK) lagen die Mittelwerte der Symbole P und B nicht in den Konfidenzintervallen der Symbole X, L und E, bei der Änderung der Position des posterioren Linsenpols(ΔPLS) bildete Symbol B eine Ausnahme. Da es sich aber um Werte von $3\mu m$ bei ΔVK und von $1\mu m$ bei ΔPLS handelt, sind diese Ergebnisse nicht aussagekräftig genug.

Für keines der fünf Symbole ergab sich durchgängig die kleinste oder größte Standardabweichung. Es besteht weder eine Konstanz bezüglich der Messgrößen Hornhautdicke, Vorderkammertiefe, Linsendicke und des posterioren Linsenpols, noch können bei 0, -1, -3 und -5d konstante Messwerte festgestellt werden.

5.3 Standardabweichung der Absolutwerte für das favorisierte Symbol im Vergleich zur Standardabweichung für das Symbol B

Bei den Akkommodationsmessungen mit dem ACMaster konnte eine Abhängigkeit zur Konzentrationsfähigkeit des Probanden festgestellt werden. 15 Probanden gaben ein favorisiertes Symbol an, die gleichzeitig das Symbol B als das Unangenehmste empfanden. Durch das intermittierend auftretende X schien es den Probanden eigenen Angaben zufolge schwerer zu fallen, das Symbol konstant scharf zu stellen. Der Vergleich der Standardabweichung des favorisierten Symbols und des Symbol B sollte zeigen, ob die subjektive Empfindung der Probanden Einfluss auf die Reizsetzung bei der Akkommodation hat. Die Ergebnisse der vorangegangenen Abschnitte konnten diese subjektiven Empfindungen nicht bestätigen.

Chauhan & Charman wiesen 1996 nach, dass intermittierende Reizsetzung keine Schwierigkeiten bei der Akkommodation hervorrufen.

Beim t-Test waren hier keine signifikanten Unterschiede zwischen dem favorisierten Symbol und dem Symbol B festzustellen.

Aus den Diagrammen der Abb. 22 - 24 ist ersichtlich, dass bei den meisten Probanden die Standardabweichung des einen Symbols im Konfidenzintervall des anderen Symbols liegt. Bei ein paar Probanden war dies nicht der Fall, so dass davon auszugehen ist, dass die Wahl des Symbols hier Einfluss genommen hat. Diese Probanden konnten die Akkommodation bei ihrem favorisierten Symbol konstanter halten, im Vergleich zum Symbol B. Somit verkleinerte sich die Standardabweichung und die Akkommodationsmessungen wurden präziser. Dies konnte auch bei den Ergebnissen jedes einzelnen Probanden festgestellt werden.

Daraus kann die Schlussfolgerung gezogen, dass die Reizsetzung, bezüglich der Standardabweichung bei vereinzelt Probanden eine Rolle gespielt hat.

Die Probanden waren sich hinsichtlich der Wahl des favorisierten Symbols nicht einig: 35% favorisierten den Landoltring, 20% den Punkt, 15% das Symbol E und 5% das Symbol X.

Es bietet sich daher an, Patienten, die am ACMaster und an anderen optischen Geräten vermessen werden sollen, eine Auswahl an Akkommodationsreizen zu präsentieren, um präzisere Messergebnisse zu erhalten, indem die Standardabweichung minimiert wird.

Auch für den Untersucher war festzustellen, dass bei erhöhter Konzentration der Probanden die Überlagerung der Reflexe des vorderen und des hinteren Linsenpols vereinfacht wurde. Durch das intermittierend auftretende X waren die Probanden häufig irritiert, änderten die Blickrichtung und die Linse bewegte sich minimal. Bei den favorisierten Symbolen war diese Bewegung der Linse nicht festzustellen, so dass die Messzyklen schneller beendet werden konnten. Das Symbol P stellte mit drei Pixeln das kleinste dar, was den Probanden die Fixation erleichterte. Dies konnte während der Messungen festgestellt werden, da sich das Auge kaum bewegte.

Durch kürzer andauernde Messzyklen lässt sich wiederum die Standardabweichung minimieren, und die Untersuchung ist sowohl für den Probanden als auch für den Untersucher unkomplizierter.

5.4 Symbol L: Verlauf der 30 Einzelmessungen

Bei vier Probanden zeigte sich eine besonders hohe Konzentrationsfähigkeit, und es konnten vollständige Interferogramme >15 festgestellt werden. Die Darstellung der 30 Einzelmessungen sollte zeigen, ob signifikante Unterschiede zwischen den ersten fünf und den letzten fünf Messungen festzustellen waren. Da die Änderungen von 0d zu -1d zu gering und die Standardabweichungen bei -1d sehr klein waren, wurden die Messungen bei -1d nicht ausgewertet. Aus Diagramm 26 ist ersichtlich, dass sich nach anfänglichem kurzem Nachgeben der Akkommodation ein relativ stabiler Akkommodationsverlauf einstellte. Erwartet wurde ein Verlauf, bei dem nach der 10. und 20. Messung wieder ein Anstieg der Akkommodation zu erkennen ist, da die Öffnung des Landoltrings gedreht wurde und somit eine Neueinstellung der Reflexe vorgenommen werden musste. In den Diagrammen konnte allerdings kein erneuter Anstieg der Akkommodation festgestellt werden.

Bei Proband 1 zeigten sich bei der Vorderkammertiefen(Δ VK)- und der Linsendickenänderung(Δ LD) bei -3d signifikante Unterschiede. Bei der Änderung der Position des posterioren Linsenpols(Δ PLS) waren signifikante Unterschiede bei den Probanden 1 und 4 bei -3d und bei Proband 3 bei -5d festzustellen.

Da sich diese Probanden durch hohe Konzentrationsfähigkeit auszeichneten, kann davon ausgegangen werden, dass bei den restlichen Probanden in noch größerer Häufigkeit signifikante Unterschiede auftreten. Betrachtet man die Diagramme in den Abb. 27-29 ist zu erkennen, dass die Akkommodation nachlässt. Werden die Ergebnisse der vier Probanden auf das gesamte Probandengut übertragen, so lässt sich aussagen, dass bei ΔVK und ΔLD vereinzelt signifikante Unterschiede auftreten. Bei ΔPLS allerdings sind bei etwa 37% der Probanden (= 7 Probanden) signifikante Unterschiede festzustellen, die sich allerdings weder männlichen noch weiblichen Probanden zuordnen lassen. Diese Änderungen scheinen jedoch durch die Vorderkammertiefenänderung ausgeglichen zu werden, da die Linsendickenänderung konstant bleibt.

Die Datenmenge dieser Arbeit ist jedoch nicht ausreichend, um eindeutige Aussagen machen zu können, denn bei einigen Probanden konnten die ersten 10 Messungen nicht ausgewertet werden, bei anderen wiederum die letzten 10 nicht.

5.5 Zeitverlauf der Einzelmessungen für alle Symbole

Bei Betrachtung der einzelnen Diagramme und Tabellen konnte auch bei dieser Auswertung keine Regelmäßigkeit bezüglich der Konstanz der Akkommodation während der Messzyklen festgestellt werden. Zum einen blieben die Werte konstant, zum anderen nahmen sie ab oder zu. Auch hier ließ die Akkommodation insgesamt nach.

Die häufigsten signifikanten Unterschiede der Mittelwerte lagen beim posterioren Linsenpol vor ($p < 0,05$ = sechsmal), bei der Vorderkammertiefe fünfmal und der Linsendicke lediglich dreimal. Bei dieser einen ausgewählten Probandin war festzustellen, dass das Symbol L die häufigsten Abweichungen der Mittelwerte zeigt, das Symbol B die wenigsten, obwohl die Probandin als favorisiertes Symbol den Landoltring angab und das „unangenehmste“ Symbol das blinkende X war. Somit besteht eine negative Korrelation, was die Wahl des Symbols anbetrifft. Entgegen der Erwartungen waren beim favorisierten Symbol erhöht auftretende signifikante Unterschiede festzustellen.

Auch als Einzelfall, bei einer Probandin deren Konzentrationsfähigkeit hoch war und bei der die Messreihen zügig durchgeführt werden konnten, konnte kein signifikanter Unterschied bei der Reizsetzung festgestellt werden. Das favorisierte Symbol und das subjektiv unangenehmste Symbol unterschieden sich nicht voneinander.

5.6 Reproduzierbarkeit

Im Abstand von 12 Monaten wurden bei fünf Probanden die gleichen Messzyklen mit den Symbolen X, P und B erneut durchgeführt.

Hier war festzustellen, dass bei allen drei Symbolen die Hornhautdicke konstant blieb, dass die Vorderkammertiefe größer wurde, die Linse an Dicke zunahm und dass sich der posteriore Linsenpol nach hinten bewegte.

Es zeigte sich, dass bei einer Reizstärke von -5d die Mittelwerte der Hornhautdicke, der Vorderkammertiefe und der Linsendicke der ersten Messreihe im Konfidenzintervall der zweiten lagen und umgekehrt. Beim posterioren Linsenpol des Symbol X lag der Mittelwert der zweiten Messreihe nicht im Konfidenzintervall der ersten, umgekehrt allerdings nicht, bei den anderen beiden Symbolen lagen sowohl die Mittelwerte der ersten Messreihe, als auch die Mittelwerte der zweiten außerhalb der Konfidenzintervalle. Zusätzlich wurde ein t-Test durchgeführt, der zeigte, dass beim posterioren Linsenpol bei -5d zwischen erster und zweiter Messreihe signifikante Unterschiede bestehen. Ursache hierfür könnte einerseits die Alterung der Linse sein oder aber äußere Einflüsse, andererseits könnten auch Mikrofluktuation dafür verantwortlich sein. Solche Schwankungen der biometrischen Größen des okularen Vorderabschnitts im Tagesverlauf wie auch in größeren zeitlichen Intervallen sind bekannt und gegenwärtig Gegenstand mehrerer Studien (Haigis, persönl. Mitteilung). Da jedoch keine signifikanten Unterschiede bei der Linsendickenänderung festzustellen sind, kompensiert wahrscheinlich die viel größere Vorderkammertiefenänderung diese Unterschiede.

Es liegt also insgesamt eine hohe Reproduzierbarkeit vor.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die ermittelte Datenmenge teilweise nicht ausreichend ist, um definitive Aussagen bezüglich des Einflusses des optischen Akkommodationsreizes auf Änderungen von Distanzen im okularen Vorderabschnitt machen zu können.

Bei der Summenauswertung konnte festgestellt werden, dass Symbol B die kleinste Änderung der Vorderkammertiefe und der Linsendicke hat, Symbol E hat die kleinste Änderung des posterioren Linsenpols. Myope Probanden akkommodieren bei den Symbolen P und B schlechter, Symbol E stellt wiederum beim posterioren Linsenpol eine Ausnahme dar.

Bei einigen Probanden spielte die Auswahl des Symbols eine Rolle. Aufgrund dieser Erkenntnis sollte es den Probanden ermöglicht werden, vor den Akkommodationsmessungen am ACMaster ein Symbol ihrer Wahl auszusuchen.

Bei den Ergebnissen der Untersuchung „Verlauf der 30 Einzelmessungen“ wurde diskutiert, ob während eines Messzyklus die Akkommodation nachlässt und signifikante Unterschiede zwischen den ersten fünf und den letzten fünf Messungen auftreten.

Diese Ergebnisse lassen insgesamt die Schlussfolgerung zu, dass die Symbole P, B und E eher ungeeignet sind. Symbol L wurde am Häufigsten favorisiert und zeigt den kleinsten Interquartilbereich (vgl. Abb.18), was für die erreichbare Genauigkeit mit diesem Symbol spricht.

Es wird deutlich, dass die Beurteilung intraokularer Distanzen und okularer Größen starken interindividuellen, aber auch intraindividuellen Schwankungen unterliegen. Messungen in vivo am Auge ergeben oft unterschiedliche Werte, da jede Aktion des Auges individuell stattfindet. Gründe für mögliche Fehler bzw. Diskrepanzen bei den in dieser Arbeit durchgeführten Messungen sind eher mit geringer Wahrscheinlichkeit dem ACMaster zuzuschreiben, sondern liegen im größeren Maße bei der Konzentrationsfähigkeit der Probanden.

Nach der gewonnenen Erfahrung beinhalten die Schwierigkeiten bei biometrischen Messungen während der Akkommodation Sakkaden der Augen und die natürlichen Fluktuationen der Akkommodation. Die bei der Akkommodation auftretenden Fluktuationen stellen ein physiologisches Phänomen dar, das hilft, die Fokussierung

eines Bildes auf der Retina zu erreichen. Diese Fluktuationen nehmen bei ansteigender Reizstärke in ihrer Größe zu oder aber wenn das Auge ermüdet (Charman 1988). Diese Zunahme der Fluktuationen kann die Ergebnisse biometrischer Untersuchungen beeinflussen.

Die vorliegende Arbeit zeigt, dass die Messung der noch vorhandenen Akkommodation des Auges grundsätzlich einen wesentlichen Beitrag für die Entwicklung potentiell akkommodativer Linsen leisten kann. Die Laserinterferenzbiometrie eignet sich sehr gut dafür, akkommodativ bedingte Änderungen des Vorderabschnitts mit hoher Präzision angeben zu können. Für diese Messungen ist die Wahl des richtigen Reizes zweifellos wichtig. Aufgrund dieser Erkenntnisse ist es durchaus denkbar, dass der ACMaster künftig für Standarduntersuchungen vor Therapie der Presbyopie und in der refraktiven Chirurgie verwendet werden kann.

Die meisten Messungen für diese Arbeit fanden am Spätnachmittag, bzw. am Abend statt. Es ist wahrscheinlich, dass der relativ spät am Tag gewählte Zeitpunkt Einfluss auf die Konzentrationsfähigkeit der Probanden und somit auf die Akkommodationsfähigkeit hatte.

6 Zusammenfassung

Der Zeiss ACMaster ermöglicht mittels Laser-Interferenz-Biometrie eine kontaktlose patienten- und untersucherfreundliche Messung der Akkommodation.

Voraussetzung für optimale Ergebnisse im Rahmen dieser Arbeit sind emmetrope Probanden und eine geeignete Reizsetzung. Zusätzlich ist die Kooperationsfähigkeit des Probanden/Patienten und dessen Konzentrationsfähigkeit von großer Bedeutung. Messungen mit Brille sind nicht möglich. Mit diesen Voraussetzungen ist es möglich, präzise Daten über die Vorderkammertiefe, die Linsendicke und die Lage des posterioren Linsenpols und somit über die Akkommodation zu erhalten.

Als am besten geeignete Reize haben sich in der Vergangenheit optische Reize erwiesen. Daher wurden den Probanden fünf verschiedene Reizquellen geboten, die sie jeweils bei 0, -1, -3 und -5d scharf stellen mussten: ein X als Standardsymbol, ein Punkt (bestehend aus drei Pixeln), ein blinkendes X, einen Landoltring mit drehbarer Öffnung und ein schwarzes E, bei welchem sich der Hintergrund veränderte.

Die Probanden reagierten mit unterschiedlicher Konzentrationsfähigkeit auf die Reizsetzung. Bei Einigen spielte es eine Rolle, auf welches Symbol sie blickten, bei den meisten jedoch waren die Ergebnisse unabhängig vom verwendeten Reiz.

Aus den Resultaten dieser Arbeit lässt sich sagen, dass die Symbole P, B und E eher ungeeignet sind, da die Akkommodationsänderungen im Vergleich zu den Symbolen X und L geringer sind. Bei vereinzelt Probanden hat bei bestimmten Messzyklen die Wahl des optischen Akkommodationsreizes einen positiven Einfluss auf akkommodative Änderungen von Distanzen im okularen Vorderabschnitt, bei den meisten Probanden hat die Reizauswahl jedoch keinen Einfluss.

Als Resultate ergaben sich in geometrischer Weglänge im Durchschnitt Änderungen der Vorderkammertiefe von 0,020mm/d bei -1d, 0,127mm/d bei -3d, 0,227mm/d bei -5d, Änderungen der Linsendicke um 0,027mm/d bei -1d, 0,153mm/d bei -3d, 0,276mm/d bei -5d und Änderungen des posterioren Linsenpols von 0,008mm/d bei -1d, 0,026mm/d bei -3d und 0,049mm/d bei -5d.

Diese Änderungen traten bei alle Symbolen in gleicher Weise auf.

Diese erzielten Ergebnisse stehen in Übereinstimmung mit der Literatur.

Insgesamt hat sich gezeigt, dass es mit dem ACMaster möglich ist, die akkommodationsbedingte Distanzänderung mit sehr hoher Präzision zu messen, wie es mit anderen Geräten bisher nicht möglich war. Bei entsprechender Compliance der Patienten kann der ACMaster erfolgreich in der Akkommodationsforschung eingesetzt werden.

7 Literaturverzeichnis

Alexandridis E: Die Pupille. Physiologie, Untersuchung, Pathologie. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York 1982, S.7-8

Alexandridis E: Pupille, Akkommodation. In: Straub, W, Kroll, P, Küchle HJ (Hrsg.): Augenärztliche Untersuchungsmethoden. Ferdinand Enke Verlag Stuttgart 2.Auflage 1995, S.325-341

Alio JL, Schimchak P, Montes-Mico R, Galal A: Retinal image quality after microincision intraocular lens implantation. Journal of cataract and refractive surgery Vol.31 Issue 8 2005, S.1557-1560

Alpern M: Accommodation. In: Davson H ed.: The eye. New York Academic Vol.3 1969, S.237-238

Baumhoer D, Steinbrück I, Götz W: Histologie. Urban & Fischer 1.Auflage 2000, S.238-240

Beers APA, van der Heijde GL: Age-related changes in the accommodation mechanism. Optom Vis. Sci. 73/4 1996, S.235-242

Bucher O, Wartenberg H: Cytologie, Histologie und mikroskopische Anatomie des Menschen. Verlag Hans Huber 12.Auflage 1997, S.452-460

Campbell FW: Accommodation reflex. British orthoptic journal Nr.11 1954, S.13-17

Campbell FW, Westheimer G: Factors influencing accommodation responses of the human eye. Journal opt. Soc. Am. 48 1959, S.568-571

Campbell FW, Westheimer G: Dynamics of accommodation responses of the human eye. *Journal Physiol.* 151 1960, S.285-295.

Carter JH: A servoanalysis of the human accommodation mechanism. *Archs Soc. Am. Ophth. Opt.* 4 1962, S.137-168.

Charman WN, Heron G: Fluctuations in accommodation: a review. *Ophthal. Physiol. Optic* 8 1988, S.153-164

Chauhan K, Charman WN: Accommodation responses to flickering stimuli. *Ophthal. Physiol. Opt.* Vol.16 Issue No.5 1996, S.391-408

Coleman DJ: Unified model for accommodative mechanism. *American Journal of Ophthalmology* 69 1970, S.1063-1079

Cramer A: Het Accommodatievermogen der Ooogen physiologisch toegelicht. *Leer* 1855, S.58

Döring-Coen C: Grauer Star (Katarakt). *Netdokter.de*, Stand März 2004
http://www.netdokter.de/Krankheiten/Fakta/grauer_star.htm

Dubbelman M, van der Heijde GL, Weeber HA: Change in shape of the aging human crystalline lens with accommodation. *Vision Research* Vol.45 2005, S.117-132

Duane A: Studies in monocular and biocular accommodation with their clinical applications. *Amer. J. Ophthalm.* 5 1922, S.865-877

Duke-Elder S, Abrams D: Ophthalmic optics and refractions. In: Duke-Elder S (ed.): *System of Ophthalmology*. The C.V. Mosby Company Vol.5 1970, S.155-183

Duke-Elder S, Wabbar KC: The anatomy of the visual system. In: Duke-Elder S ed.: *System of ophthalmology*. London Henry Kimpton Vol.2 1961, S. 80-81

Fincham EF: The accommodation reflex and its stimulus. British Journal of Ophthalmologie Vol. 35 1951, S.381-393

Friedburg D: Ophthalmologische Optik. In: Axenfeld Th, Pau H: Lehrbuch der Augenheilkunde. Gustav Fischer Verlag Stuttgart Jena New York 13.Auflage 1992, S.3 und S.10-11

Graves B: The response of the lens capsule in the act of accommodation. Trans Am Ophthalmology Soc. 23 1925, S: 184- 196

Grehn F: Augenheilkunde. Springer Verlag 29.Auflage 2005, S.389-393

Gullstrand A: Der Mechanismus der Akkommodation. In: Nagel W (Hrsg.): Handbuch der physiologischen Optik. von H. von Helmholtz Band1. Leopold Voss Verlag 3.Auflage 1909, S.327-353

Haigis W, Hasche H, Much M: Anterior segment biometry with laser precision: PCI vs. Ultrasound. In: Nemeth J, Csakany P, Barcsay G (eds): Ophthalmic echography. Nyctalus Budapest 2006, S.54-59

Haigis W, Lege BAM: Ultraschall-Biometrie und optische Biometrie. In: Kohnen Th, Ohrloff C, Wenzel M (Hrsg.): 13. Kongress der DGII 1999 in Frankfurt. Biermann Verlag Köln 2000a, S.180-186

Heijde van der GL, Beers APA, Dubbelman M: Microfluctuations of steady-state accommodation measured with ultrasonography. Ophthal. Physiol. Opt. Vol.16 No.13 1996, S.216-221

Helmholtz von H: Der Mechanismus der Akkommodation. In: Nagel W (Hrsg.): Handbuch der physiologischen Optik. von H. von Helmholtz Band1, Leopold Voss Verlag 3.Auflage 1909, S.120-146

Hill L: Blood vessels and pressure. Lancet 1 1920, S.359-366

Ittelson WH, Ames A: Accomodation, convergence, and their relation to apparent distance. Journal Psychol. 30 1950, S.43-62

Kammann J, Dornbach G: Flexible Intraokularlinsen. In: Ohrloff C, Kohnen Th, Duncker G: 11. Kongress der Deutschsprachigen Gesellschaft für Intraokularlinsen- und Implantation und refraktive Chirurgie Springer Verlag 1998, S.29-43

Klinke R, Silbernagel S: Lehrbuch der Physiologie. Thieme Verlag Stuttgart 3.Auflage 2001, S.612-618

Kruger P, Pola J: Stimuli for accommodation: blur, chromatic abberation and size. Vision research Vol.26 No.6 1986, S.957-971

Lang GK: Augenheilkunde, Verstehen-Lernen-Anwenden. Thieme Verlag Stuttgart 1998, S.181-182

Lutz J: Physiologie, anatomische Abbildungen, Embryologie und Grundbegriffe der Genetik. In: Collins JF, Augustin AJ (Hrsg.): Augenheilkunde. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1997, S.837 und S.886

Mencucci R, Ponchiotti C, Virgili G, Giansanti F, Menchini U: Corneal endothelial damage after cataract surgery: Microincision versus standard technique. Journal of cataract and refractive surgery Vol.32 Issue 8 2006, S.1351-1354

Menozzi M, Krueger H: Mikrofluktuationen der Akkommodation. Klinisches Monatsblatt Augenheilkunde 210 1997, S. 325-326

Morgan MW: accommodation and vergence. Am. J. Optom. 7 1968, S.417-454

Philips S, Stark L: Blur: a sufficient accommodative stimulus. Doc. Ophthalmology Vol.43,1 1977, S.65-89

Netter FH: Atlas der Anatomie des Menschen. Thieme Verlag Stuttgart New York 2.Auflage 1999, S.85

Rohen JW: Morphologie und Embryologie des Sehorgans. In: Francois J, Hollwich F (Hrsg.): Augenheilkunde in Klinik und Praxis Band 1. Thieme Verlag Stuttgart New York 1977, S.1-26

Sachsenweger R: Funktionsprüfung und Funktionsstörung. In Axenfeld Th, Pau H: Lehrbuch und Atlas der Augenheilkunde. Gustav Fischer Verlag Stuttgart New York 12.Auflage 1980, S.22-24

Schachar RA: Cause and Treatment of Presbyopia with a method for Increasing the amplitude of accommodation. Annals of Ophthalmologie 24 1992, S.445-448

Schachar RA, Tseng H, Xin H: Mathematic proof of Schachar's hypothesis of accommodation. Annals of Ophthalmology 25 1993, S.5-9

Stark L, Takahashi Y & Zames G: Nonlinear servoanalysis of human lens accommodation. IEEE Trans. SSC-1 1965, S.75-83

Straub W, Kroll P, Kühle HJ (Hrsg.): Augenärztliche Untersuchungsmethoden. Ferdinand Enke Verlag Stuttgart 2.Auflage 1995, S.29

Trepel M: Neuroanatomie. Urban & Fischer 2.Auflage 1999 S.214-217

Troelstra A, Zuber BL, Miller D & Stark L: Accommodative tracking: A trial-and-error function. Vision research Vol.4 1964, S.585-594

Wenzel M, Pham D, Scharrer A, Schayan K, Klasen J: derzeitiger Stand der ambulanten Intraokularchirurgie: Ergebnisse der Umfrage 2007 des BDOC, BVA und der DGII. Ophthalmo-Chirurgie 20 2008, S.137-146.

Danksagung

Mein Dank gilt Priv.-Doz. Dr. Wolfgang Haigis für die interessante Aufgabenstellung und die Übernahme des Referates.

Vielen Dank für die freundliche und stetige Betreuung, die vielfältige Unterstützung und Hilfe durch immerwährende Diskussionsbereitschaft bei allen diese Arbeit betreffenden Fragestellungen.

Prof. Dr. Erhard Wischmeyer danke ich für die Übernahme des Koreferates.

Besonderen Dank möchte ich allen Probanden aussprechen, die sich bereitwillig im Rahmen dieser Arbeit untersuchen ließen.

Ferner möchte ich mich bei allen Freunden bedanken, die mir stets mit Rat und Tat zur Seite standen.

Mein herzlicher Dank gilt auch meinen Eltern und meinem Bruder für die liebevolle und tatkräftige Unterstützung.