

**Vermessung der geometrischen und  
densitometrischen Eigenschaften des vorderen  
Augenabschnitts von  
Kindern und Jugendlichen im Alter von drei bis  
zwanzig Jahren**

Inaugural-Dissertation  
zur Erlangung des Doktorgrades  
der Hohen Medizinischen Fakultät  
der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität  
Bonn

**Irina Dechond**  
aus Talmenka/Russland

2025

Angefertigt mit der Genehmigung  
der Medizinischen Fakultät der Universität Bonn

1. Gutachter: PD Dr. rer. nat. Alfred Wegener
2. Gutachter: Prof. Dr. Rainer Ganschow

Tag der Mündlichen Prüfung: 11.02.2025

Aus der Klinik und Poliklinik für Augenheilkunde der Universität Bonn

## Inhaltsverzeichnis

<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	5
<b>1.    Einleitung</b>	6
1.1    Einführung in die theoretischen Grundlagen	8
1.1.1  Aufbau und Funktion des vorderen Augenabschnittes	8
1.1.1.1  Hornhaut	10
1.1.1.2  Linse	10
1.1.2  Hinterer Augenabschnitt	11
<b>2.    Material und Methoden</b>	12
2.1    Genehmigungsverfahren	12
2.2    Patientenkollektiv	12
2.2.1  Einschlusskriterien	15
2.2.2  Ausschlusskriterien	15
2.3    Scheimpflug-Fotografie	15
2.3.1  Entwicklung der Scheimpflug-Fotografie	15
2.3.2  Prinzip der Scheimpflug-Fotografie	17
2.4    Pentacam® HR	19
2.5    Ablauf der Messung	21
2.5.1  Information der Probanden	21
2.5.2  Platzierung der Probanden und Auslösung der Messung	21
2.5.3  Erste Beurteilung der Messung	22
2.6    Statistische Methodik	23
<b>3.    Ergebnisse</b>	24
3.1    Probandeneinteilung	24
3.2    Dicke der Hornhaut	25
3.2.1  Pachymetrie nach Geschlecht	27
3.2.2  Pachymetrie nach Altersgruppen	29
3.3    Hornhautkrümmung	32
3.3.1  Hornhautkrümmung unabhängig von Geschlecht und Alter	32
3.3.2  Hornhautkrümmung nach Geschlecht	33

3.3.3	Hornhautkrümmung nach Alter	34
3.4	Vorderkammertiefe	35
3.4.1	Vorderkammertiefe im Vergleich der Geschlechter	35
3.4.2	Vorderkammertiefe im Vergleich der Altersgruppen	35
3.5	Linsendicke	37
<b>4.</b>	<b>Diskussion</b>	<b>40</b>
<b>5.</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>44</b>
<b>6.</b>	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>46</b>
<b>7.</b>	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>48</b>
<b>8.</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>55</b>
<b>9.</b>	<b>Danksagung</b>	<b>62</b>

## Abkürzungsverzeichnis

Abb.	Abbildung
BGB	Bürgerliches Gesetzbuch
ca.	circa
df	Anzahl der Freiheitsgrade
dpt	Dioptrien
et al.	et alia
F-Wert	Verhältnis von zwei Varianzen
°	Grad (Winkeleinheit)
HH-Krümmung	Hornhautkrümmung
k-Wert	kritischer Wert in der Testtheorie
µm	Mikrometer
mm	Millimeter
mm <sup>2</sup>	Quadratmillimeter
n	absolute Anzahl einer bestimmten Gruppe/Menge
QS	Qualitäts-Spezifikation
±	Plusminus
§§	Paragrafen (Zitieren mehrerer gesetzlicher Normen)
%	Prozent
p-Wert	Überschreitungswahrscheinlichkeit, Signifikanzwert
®	Registered Trademark („eingetragene Handelsmarke“)
SPSS	Statistical Package für Social Sciences
t-Test	Hypothesentest mit t-verteilter Testprüfgröße
Tab.	Tabelle
z.B.	zum Beispiel

## 1. Einleitung

Der Fähigkeit und Funktion des Sehens wird epochen- wie kulturübergreifend eine erhebliche Bedeutung beigemessen. So konstatiert Ernst Freiherr von Feuchtersleben im Jahr 1838: „Ist das Auge klar, so ist es auch die Welt.“ (Feuchtersleben, 1838).

Jeder vierte gesetzlich Versicherte sucht mindestens einmal jährlich einen Augenarzt auf und bereits im Jahr 2011 waren 40 % dieser Patienten 65 Jahre oder älter (Krauth et al., 2012). Dieser Trend wird durch den demographischen Wandel und die zunehmende Lebenserwartung verstärkt, sodass auch die erhobenen Daten von Patienten im Erwachsenenalter dominieren. Mitursächlich für das Ungleichgewicht in Bezug auf die Datenlage ist zudem die Versorgungslage in der Augenheilkunde. Während die Augenheilkunde die am vierthäufigsten frequentierte Arztgruppe nach Hausärzten, Gynäkologen und Internisten darstellt, repräsentieren die Augenärzte nur 2% der berufstätigen Ärzteschaft (Wolfram et al., 2012). Insofern liegt der Fokus zwangsläufig auf der Behandlung und Erforschung von Pathologien, welche in Qualität und Quantität überwiegend im Erwachsenenalter auftreten; exemplarisch zu nennen sind hierbei die AMD, das Glaukom oder die diabetische Retinopathie (Bertram et al., 2014).

Obgleich die Mehrheit der Augenerkrankungen im höheren Lebensalter auftritt, können diese im Allgemeinen oder auch solche des Erwachsenenalters bei Kindern auftreten. Hierbei gilt die Besonderheit, dass bei Augenerkrankungen in den ersten Lebensjahren eine Amblyopie droht (Ehrt, 2010). Ferner stellt die Myopie ein zunehmendes und weltweites Problem dar, welches mit schwerwiegenden organischen Folgeerkrankungen sowie steigenden sozioökonomischen Folgen einhergeht (Lim et al., 2013). Die medizinische Indizierung für Untersuchungen der Augen im Kindes- und Jugendalter zeigt sich insbesondere an den obligatorischen Vorsorgeuntersuchungen (Wolfram et al., 2019).

Folglich besteht eine Diskrepanz zwischen einerseits der Bedeutung von Augenuntersuchungen im Kindesalter und andererseits der diesbezüglich unzureichenden Datenlage. Diesen Widerspruch adressiert die vorliegende Doktorarbeit in Bezug auf den vorderen Augenabschnitt. Während biometrische Daten des vorderen Augenabschnitts bei Erwachsenen umfangreich vorliegen, sind exakte biometrische

Daten für den vorderen Augenabschnitt bei augengesunden Kindern und Jugendlichen in der Entwicklungsphase weit weniger gut untersucht.

Mit der Einführung der Scheimpflug Photographie in die Augenheilkunde durch Niesel und Drews ist die Möglichkeit geschaffen worden, den vorderen Augenabschnitt menschlicher Augen aller Altersstufen tiefenscharf und dreidimensional zu vermessen (Drews, 1964; Niesel, 1966). Die Pentacam® HR, welche auf dem Scheimpflugprinzip basiert, ist ein modernes Gerät zur digitalen Erfassung der biometrischen Daten des vorderen Augenabschnitts. Die Zielsetzung der vorliegenden Arbeit besteht darin, eine repräsentative Darstellung der statistischen Kenngrößen des vorderen Augenabschnitts bei Kindern und Jugendlichen zu ermitteln. Die Kenntnis dieser Größen kann im klinischen Alltag in der Augenheilkunde von Bedeutung sein, beispielsweise bei der Berechnung von Kunstlinsen bei kindlichen Katarakten oder zur Entwicklung von Formeln, um diese zu berechnen und somit eventuell ein besseres visuelles Ergebnis zu erlangen.

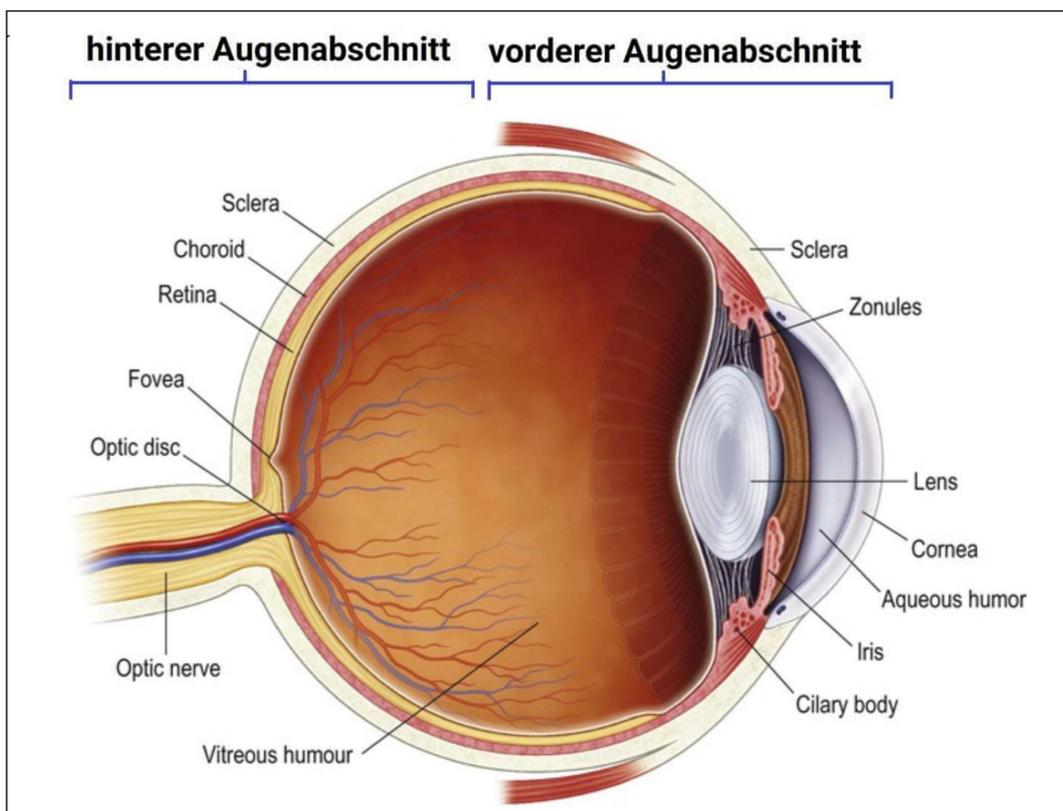
Für die Durchführung dieser Arbeit wurden an der Augenklinik der Universität zu Bonn in der orthoptischen Ambulanz Kinder und Jugendliche im Alter von drei bis zwanzig Jahren untersucht und die wichtigsten Parameter des vorderen Augenabschnittes verglichen. Die Rekrutierung der Teilnehmer erfolgte mit Einverständnis der Eltern. Soweit möglich, wurden beide Augen untersucht.

## 1.1. Einführung in die theoretischen Grundlagen

### 1.1.1 Aufbau und Funktion des Auges

Das Auge ist ein hochspezialisiertes Organ, das ein optisches System aus Hornhaut und Linse nutzt, um Licht unterschiedlicher Wellenlängen mit Hilfe von Photorezeptoren in der Netzhaut aufzuzeichnen und im Gehirn zu Bildern zu verarbeiten (Artal, 2015). Vereinfacht ausgedrückt lässt sich das Auge in zwei Räume einteilen (siehe Abb. 1).

Der Vorderabschnitt wird als der Raum zwischen Hornhautvorderfläche und Linsenrückfläche bezeichnet und trägt im Wesentlichen zum optischen System bei. Zum vorderen Augenabschnitt gehören die Hornhaut, die Iris, der Ziliarkörper und die Linse. Der hintere Augenabschnitt umfasst den Glaskörper, die Retina, das Pigmentepithel, die Aderhaut und die Sklera. Insgesamt ist das Auge ein geschlossenes System, welches durch den intraokularen Druck in einer konstanten Form gehalten wird. Der intraokulare Druck spielt auch für die konstante Sehschärfe eine entscheidende Rolle.



**Abb. 1:** Anatomie des menschlichen Auges (modifiziert nach Levin, 2011)

Das Licht, welches die retinalen Photorezeptoren erreicht, löst einen photochemischen Prozess aus. Durch Hyperpolarisation der Rezeptormembran und durch Änderung des Aktionspotenzials werden Informationen in den Photorezeptoren registriert und über den Sehnerv an den visuellen Kortex weitergeleitet (Grehn, 2012).

Die jeweilige Struktur des Auges, sowohl im vorderen als auch im hinteren Augenabschnitt, erfüllt eine Funktion. Diese Charakteristika lassen sich analysieren, vermessen und auch klassifizieren. Folglich können Parameter wie die Hornhautdicke, die Vorderkammertiefe, die Linsendicke, die Lichtstreuung in der Linse berechnet werden (Wirbelauer et al., 2005).

Jede dieser Strukturen kann von Pathologien betroffen sein, mitunter werden diese im Rahmen von Screening-Untersuchungen oder erst im fortgeschrittenen Stadium erkannt. Legt man Normwerte für die verschiedenen Gewebe des Auges in einer augengesunden Population zugrunde, lassen sich Pathologien früher diagnostizieren und behandeln. Demnach sind frühzeitige Untersuchungen erstrebenswert, da sich das Auge im Kinder- und Jugendalter noch entwickelt und verändert.

Die Entwicklung des Auges ist ein langwieriger Prozess und beginnt recht früh in der Schwangerschaft um den ca. 20. Tag; abgeschlossen ist die Entwicklung nach Ende des zweiten Schwangerschaftsmonats (Forrester et al., 2015). Die funktionelle Reifung und Heranbildung benötigt jedoch bis zur Geburt und darüber hinaus (Tamm und Ohlmann, 2012).

Bereits 1912 schreibt Nussbaum zur Entwicklung des menschlichen Auges, dass dessen verschiedentliche Strukturen auf unterschiedliche embryonale Herkunft zurückzuführen sind (Nussbaum, 1912). Während die innere Schicht des Augenbläschens (Entoderm) als Ursprung für die sensorische Netzhaut dient, gilt dies entsprechend für die äußere Schicht (Ektoderm) und das Pigmentepithel. Im Gegensatz dazu weisen die Blutgefäße mesodermalen Ursprung auf. Das Stroma der Hornhaut und des Ziliarkörpers sowie das Endothel entwickeln sich aus der Neuralleiste.

### 1.1.1.1 Hornhaut

Die Hornhaut ist verantwortlich für zwei Drittel der Brechkraft des Auges und somit einer der Hauptfaktoren der Refraktion im Auge (Gordon und Donzis, 1985). Klarheit und Transparenz der Hornhaut sind maßgeblich durch die Avaskularität bedingt, aber auch durch das regelmäßige Muster der Kollagenfibrillen. Im siebten Gestationsmonat erreicht die Hornhaut die Charakteristika einer jugendlichen Hornhaut. Bei der Geburt beträgt der Durchmesser 9,8 mm und die Fläche beträgt ca. 102 mm<sup>2</sup>. Im Kindesalter reift die Hornhaut weiter heran und erreicht im ungefähren Alter von zwei Jahren den Durchmesser einer erwachsenen Hornhaut von 11,7 mm, eine vordere Krümmung von +/- 44,1 dpt, sowie eine Dicke von +/- 544 µm. Bisherige Untersuchungen zeigen, dass sich die Hornhaut danach nur noch geringfügig in Größe, Form, Transparenz und Krümmung verändert (Levin, 2011).

Eine physiologische Hornhaut ist im Zentrum dünner mit durchschnittlich 544±34 µm, zur Peripherie wird sie dicker mit durchschnittlich 700 µm.

Die zentrale Gesamtdicke der Hornhaut beträgt bei Frühgeborenen 545±14 µm, bei Neugeborenen 541±06 µm, bei Kindern von 2-4 Jahren 520±07 µm, bei Kindern von 5-9 Jahren 520 ±05 µm, bei Kindern im Alter von 10-14 Jahren 520±07 µm und bei Erwachsenen +/- 520 µm (Ehlers et al., 1976).

### 1.1.1.2 Linse

Im Zeitraum zwischen dem 20. und 22. Gestationstag kommt es auf Zellebene durch Interaktion zwischen Neuralrohr und Ektoderm zur Ausbildung der Linse. Durch Verdickung und Differenzierung der Linsenplakode bildet sich über eine spätere Einstülpung das embryonale Linsenbläschen aus (Coulombre und Coulombre, 1969).

Dieser Prozess wird ab der 7. Gestationswoche durch verschiedene Wachstumsfaktoren gesteuert (McAvoy et al., 1991). Das Linsenepithel unterliegt kontinuierlichem Zellwachstum und ebenso kontinuierlich schreitet die Differenzierung neuer Faserzellen voran.

Durch das zelluläre Wachstum der Linsenblase sowie durch Proliferation und Differenzierung von Linsenfasern kommt es zur Volumenzunahme des Linsenbläschens (Forrester et al., 2015). Mit der vierten Embryonalwoche ist die Auffüllung der Linse durch die primären Faserzellen beendet und der spätere Embryonalkern entsteht (Lerche und Wulle, 1969). Im physiologischen Rahmen wächst die axiale Dicke der Linse um 0,023 mm/Jahr (Rohen, 1977). Im Erwachsenenalter flacht die Wachstumsgeschwindigkeit ab.

Die Linse als Organ verändert sich zwischen der Geburt und dem Alter in Bezug auf verschiedene Eigenschaften, insbesondere die Linsendicke, die Elastizität und die Transparenz. Parallel mit den jeweiligen Entwicklungsstufen gehen Veränderungen der Sehschärfe einher. So ist der Säugling zunächst kurzsichtig, mit Beginn der Grundschule ist das kindliche Auge emetrop ab dem 50. Lebensjahr wird das menschliche Auge hyperop.

### 1.1.2 Der hintere Augenabschnitt

Der hintere Augenabschnitt wird von dem Glaskörper, der Retina, dem retinalen Pigmentepithel und der Aderhaut gebildet. Mit Beginn der 7. Gestationswoche entwickeln sich die vorgenannten Strukturen, wobei sich diese auch über die Geburt hinweg weiter ausbilden.

## 2. Material und Methoden

### 2.1 Genehmigungsverfahren

Im Rahmen der vorliegenden Pentacam-Studie wurden Untersuchungen an Kindern und Jugendlichen durchgeführt. Hierbei wurden zum Schutz der Patienten die gesetzlichen Vorgaben sowie die Grundsätze der Deklaration von Helsinki, welche erstmals 1964 von der 18. Generalversammlung des Weltärzteverbandes erlassen und zuletzt 2013 konkretisiert wurden, gewahrt (World Medical Association, 2013). Des Weiteren ist die Studiendurchführung durch die Ethikkommission der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn genehmigt worden.

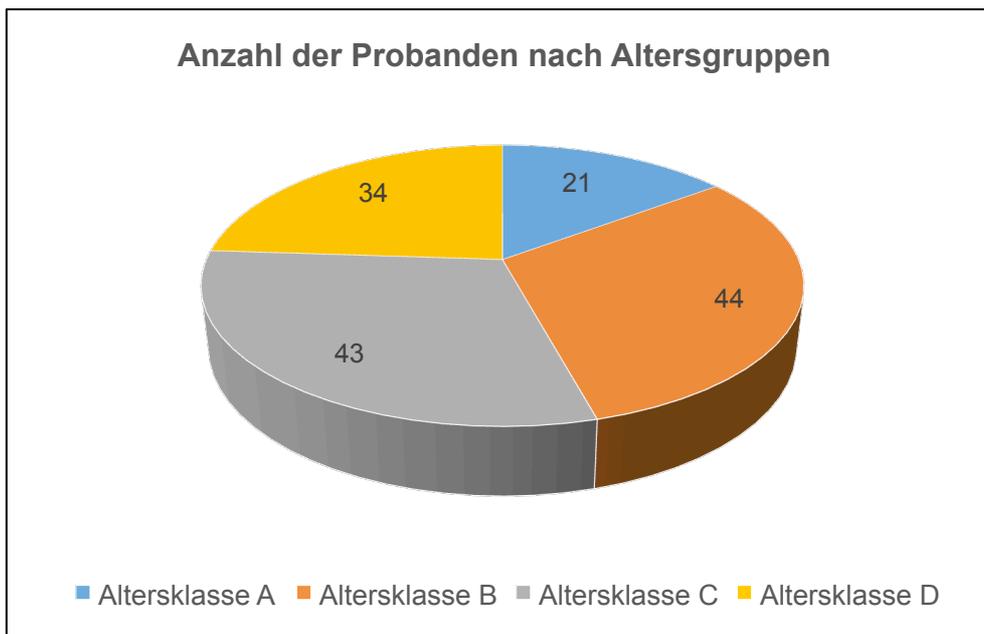
### 2.2 Patientenkollektiv

Für die vorliegende Studie wurden digitale Scheimpflug-Aufnahmen mit der Pentacam HR Kamera von insgesamt 278 Augen von 142 Kindern und Jugendlichen durchgeführt (n=278).

Die Probanden wurden in vier Altersgruppen eingeteilt (siehe Abb. 2):

- A: 2 – 5 Jahre
- B: 6 – 10 Jahre
- C: 11 – 15 Jahre
- D: 16 – 20 Jahre

Von den 142 Probanden waren 74 weiblich und 68 männlich.



**Abb. 2:** Anzahl der Probanden nach Altersgruppen

Der Großteil der Probanden wurde in der Abteilung für Orthoptik (Leiterin Frau Prof. Dr. med. Bettina Wabbels) der Universitäts-Augenklinik Bonn rekrutiert. Hierbei ist festzuhalten, dass die Probanden initial aus anderen Gründen die Klinik aufsuchten. Nach erfolgten orthoptischen und augenärztlichen Untersuchungen wurden die volljährigen Probanden bzw. im Falle der Minderjährigkeit deren Eltern als gesetzliche Vertreter der für die Studie geeigneten Patienten über die Möglichkeit einer Teilnahme informiert. Den teilnehmenden Probanden wurde die Freiwilligkeit und jederzeitige Widerrufsmöglichkeit aufgezeigt. Daraufhin wurde den Probanden die nachfolgende Einverständniserklärung zum Ausfüllen ausgehändigt (siehe Abb. 3). Nach Einwilligung erfolgte die Dokumentation des vorderen Augenabschnittes mit digitalen Scheimpflug-Aufnahmen.

### **Einverständniserklärung zur Teilnahme an der Pentacam Studie**

Die Abteilung für Orthoptik (Sehschule) der Universitäts-Augenklinik führt eine Reihenuntersuchung zur Entwicklung des Auges im Kleinkindalter, Kindes- und Jugendalter durch, zu der sie Untersuchungen des vorderen Augenabschnitts mit einer speziellen Kamera durchführen möchte. Dafür sucht die Abteilung für Orthoptik Probanden, die an dieser Studie teilnehmen. Solche Reihenuntersuchungen an augengesunden Kindern und Jugendlichen sind für die klinische Beurteilung, z.B. von Entwicklungs- und Wachstumsstörungen des Auges sehr wichtig, da Normalbefunde die Ausgangswerte für die Feststellung von Abweichungen bei der Entwicklung des Auges darstellen. Die Universitäts-Augenklinik ist im Rahmen der Krankenversorgung stets angehalten, die medizinische Forschung voranzutreiben, damit wir auch in Zukunft unseren Patienten die bestmögliche medizinische Forschung anbieten können. Dabei benötigen wir Ihre Unterstützung.

Für die Untersuchung mit der Pentacam® HR bedarf es keiner zusätzlichen Maßnahme am Auge Ihres Kindes! Die Untersuchung findet bei weitgestellter Pupille in einem abgedunkelten Raum statt, die Weitstellung der Pupille mit einer Wirkstoffkombination ist für die Untersuchung des Auges sowieso notwendig. Selbstverständlich können Sie als Eltern bei der Untersuchung dabei sein. Ein Ausdruck der Untersuchungsergebnisse wird in die Krankenakte Ihres Kindes eingeklebt werden.

Wir möchten Sie daher fragen, ob Sie Ihr Einverständnis dazu geben können, dass Ihr Kind an dieser Untersuchung teilnimmt? Die Teilnahme ist selbstverständlich freiwillig und von jeder medizinischen Behandlung Ihres Kindes in unserer Abteilung unabhängig.

Ich/wir bin/sind einverstanden, dass unser Kind an der Reihenuntersuchung in der Pentacam Studie teilnimmt!

---

Vor- und Nachname des Kindes

---

Ort, Datum, Unterschrift der Eltern/Erziehungsberechtigten  
(bitte in Druckbuchstaben ausfüllen)

---

Ort, Datum, Unterschrift/Stempel  
des aufklärenden Arztes/Untersuchers

**Abb. 3:** Einverständniserklärung zur Teilnahme an der Pentacam Studie

### 2.2.1 Einschlusskriterien

Voraussetzung für die Teilnahme an der Studie waren die Zustimmung der volljährigen Probanden bzw. im Falle der Minderjährigkeit die Zustimmung der Eltern als gesetzliche Vertreter gemäß §§ 1626, 1629 BGB. Des Weiteren waren die Kooperationsbereitschaft der Kinder und Jugendlichen ebenso obligatorisch wie die Fixationsfähigkeit. Als physiologisch unerlässlich anzusehen waren die Transparenz der Medien sowie die medikamentöse Weitstellbarkeit der Pupillen.

### 2.2.2 Ausschlusskriterien

Im Umkehrschluss führten die Ablehnung des potentiellen Probanden bzw. der Eltern zur Nichtteilnahme an der Studie. Darüber hinaus waren Fehlbildungen des Auges und Pathologien der Achsenstellung des Auges als Ausschlusskriterien anzusehen. Ferner verhinderten ein angeborener Diabetes Mellitus Typ 1 sowie der Zustand nach chirurgischen Eingriffen die Teilnahme.

## 2.3 Scheimpflug-Fotografie

### 2.3.1 Entwicklung der Scheimpflug-Fotografie

Die Aufnahmen des vorderen Augenabschnitts wurden mittels Oculus Pentacam® HR erstellt. Das Prinzip, das der optischen Funktionsweise der Kamera zugrunde liegt, ist das sogenannte Scheimpflug-Prinzip, welches nach dem österreichischen Marineoffizier und Kartographen Theodor Scheimpflug (siehe Abb. 4) benannt ist. Dieser lebte von 1865 bis 1911 und stellte das Prinzip erstmalig 1906 vor (Hockwin et al., 1987).

Bevor Scheimpflug die Einstellvorschrift für Kameras entwickelte, war die von Allvar Gullstrand im Jahre 1911 erfundene und zusammen mit der Firma Carl Zeiss konstruierte Spaltlampe das maßgebliche Instrument zur Untersuchung aller Facetten des vorderen Augenabschnitts.

Ziel von Scheimpflugs Bemühungen war die Optimierung der militärischen Luftbilder, welche vor allem aus handgezeichneten Karten bestanden und im Falle von Fotografien der Landschaften starke Verzerrungen der Perspektive aufwiesen (Wegener, 2014). Nach anfänglichen Versuchen mit einer Luftbildkamera und Optimierungen über Stereo-Comparatoren war die Methode der Luftbildvermessung geboren. Ein Anwendungsbeispiel, das auf dem Scheimpflug-Prinzip fußt, ist der virtuelle Globus „Google Earth“ ([https://www.google.com/intl/de\\_de/earth/](https://www.google.com/intl/de_de/earth/)).

Während die Scheimpflug-Technik zunächst nur in Kartografie und Architektur Einzug fand, wurden die Möglichkeiten einer Anwendung in der Augenheilkunde mittels umgebauter Photospaltlampe erstmalig 1964 (Drews, 1964) und 1966 (Niesel, 1966) vorgestellt. Die erste ophthalmologisch nutzbare Scheimpflug-Kamera wurde durch die Arbeitsgruppe um Professor Hockwin und Dragomirescu konstruiert und im Anschluss durch die Firma Topcon (Tokyo) kommerziell verfügbar gemacht (Hockwin et al., 1987).

Durch den immer höher werdenden Anspruch an die Präzision und Qualität vor allem im operativen Bereich der Katarakt- als auch refraktiven Chirurgie erfuhr die Technik Aufmerksamkeit, wodurch die Verbreitung lanciert wurde. Die elektronische Bildgebung auf Scheimpflug-Basis hat sich inzwischen zur Standardmethode für Verlaufsbeobachtungen und für die Untersuchung von unter anderem arzneimittelinduzierten Nebenwirkungen an der Linse und Hornhaut des Menschen und verschiedener Labortiere entwickelt (Wegener und Laser, 2001).



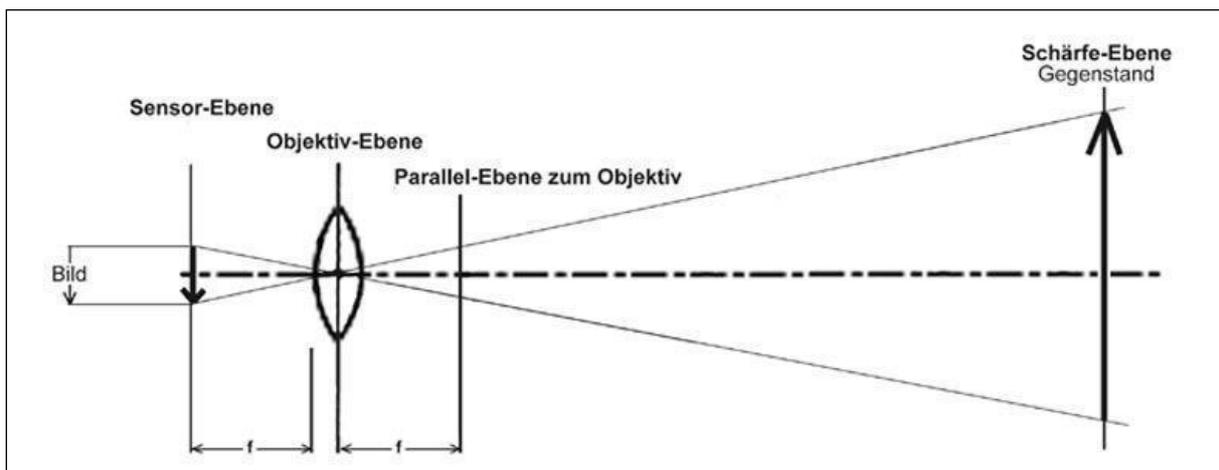
**Abb. 4:** Theodor Scheimpflug  
 (<https://www.tualumni.at/2015/04/theodor-scheimpflug/>)

### 2.3.2 Prinzip der Scheimpflug-Fotografie

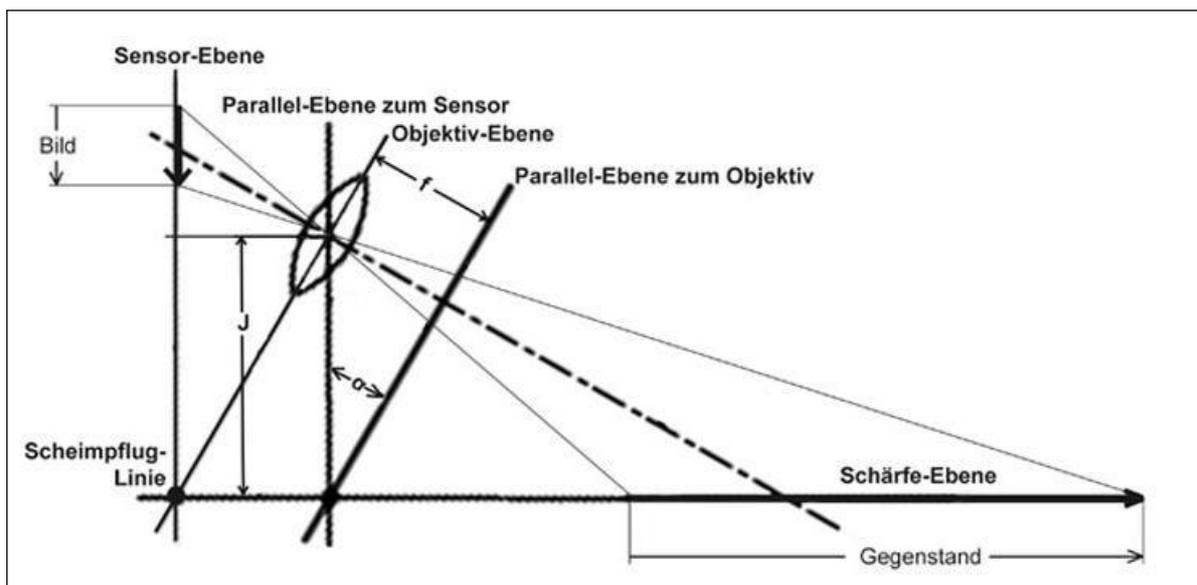
Der Fotografie nach dem Scheimpflug-Prinzip liegt das Ziel zugrunde, mehr Tiefenschärfe in den Aufnahmen zu erreichen. Dieser Zielsetzung entspricht das Bedürfnis in der Augenheilkunde nach hochauflösenden und unverzerrten Bildern der Hornhaut, der Vorderkammer und der Linse.

Den spaltlicht-mikroskopischen Aufnahmen aus der Zeit vor Scheimpflug war das Problem der räumlichen Bildverzerrung und mangelnden Tiefenschärfe inhärent (Hockwin, 1989). Ursächlich für die Defizite in den Aufnahmen war der Umstand, dass der Schärfereich einer normalen Kamera parallel zur Filmebene liegt, was zur Folge hat, dass schräggehende Gegenstände (Auge) teils unscharf abgebildet werden (siehe Abb. 5). Um dieses Problem zu lösen, basieren moderne Kameras wie die Pentacam® HR auf der Scheimpflug-Bedingung. Ausdruck der Bedingung ist die Objektivenebene so zu neigen, dass sich die Gegenstandsebene, Bildebene und Objektivenebene in einem gemeinsamen Schnittpunkt treffen und die eingeschlossenen Winkel einander entsprechen (siehe Abb. 6). Damit wird die schräge Ebene scharf auf dem Sensor abgebildet. Scheimpflug formuliert im Jahr 1907 wie folgt:

„Eine zur Objektivenebene schräg stehende Gegenstandsebene wird entzerrt und scharf abgebildet, wenn die Bildebene gegenüber der Objektivhauptebene um den gleichen Beitrag abgewinkelt wird, wobei alle drei Ebenen sich in einer Linie schneiden. Dies lässt sich erreichen durch Neigen der Bildebene (Filmebene), oder der Objektebene oder beider zusammen (Scheimpflug, 1907).“



**Abb. 5:** Normalfall, wenn Schärfebereich parallel zur Filmebene liegt (modifiziert nach Merklinger, 1993)



**Abb. 6:** Aufnahme nach dem Scheimpflug-Prinzip (modifiziert nach Merklinger, 1993)

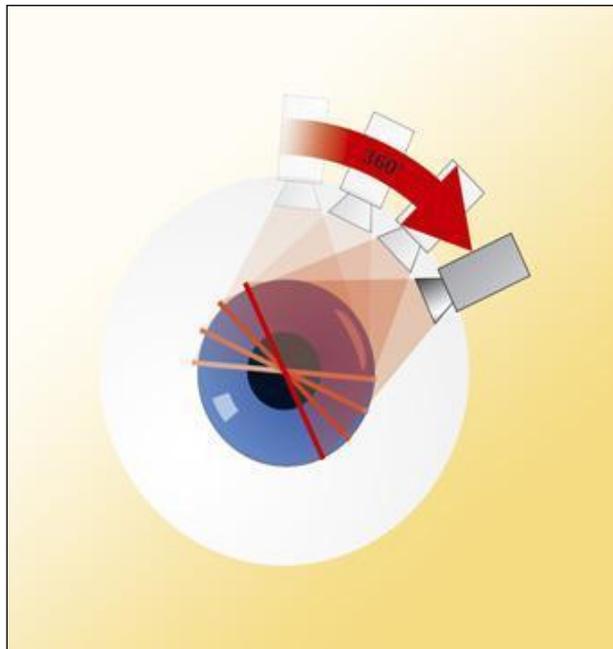
## 2.4 Pentacam® HR

Die Firma Oculus wurde 1985 als „A. Mager Spezialfabrik Ophthalmologischer Instrumente“ gegründet und stellt seitdem ophthalmologische Instrumente her. Neben den für die klinische Diagnostik zweckdienlichen Instrumenten wie dem Mesoptometer und statischer und kinetischer Perimetrie (Twinfield®) wurde im Jahr 2002 die automatisch rotierende 3D-Scheimpflugkamera Pentacam® zum ersten Mal präsentiert (McAlinden et al., 2011). Daraufhin erschien im Jahr 2005 die Pentacam® HR mit einer noch höheren Auflösung (siehe Abb. 7). Diese Kamera fand bei der vorliegenden Studie zu Messzwecken Anwendung.

Die Pentacam® HR gewährt die Möglichkeit, Datensätze zu den Strukturen des vorderen Augenabschnitts zu erheben. Die bis zu 140.000 erfassten Kantenpunkte werden als Höhenwerte erfasst und den verschiedenen Strukturen zugeordnet: Pachymetrie, Topographie, Vorder- und Rückfläche der Hornhaut, Ermittlung des Astigmatismus und Darstellung der Linse. Zur Erfassung der Schnittbilder drehen sich das Spaltlicht und die Kamera synchron um die optische Achse des Auges (siehe Abb. 8). Eine zweite Kamera erfasst mittels Ray Tracing allfällige Bewegungen, welche durch eine Software korrigiert werden. Innerhalb von zwei Sekunden werden optional 12, 25 oder 50 Aufnahmen gemacht. Durch die um die optische Achse des Auges rotierende Kamera ist es möglich, den Gesamtzustand der transparenten Medien des vorderen Augenabschnittes zu beurteilen und Abweichungen vom Normalzustand festzustellen. Die Untersuchung ist kontaktlos und somit schmerzfrei und ungefährlich. Als Referenzpunkt bei der Messung dient der Apex der Hornhaut. Die Gesamtheit der Hornhaut und der Linse wird durch den rotierenden Scan vermessen und von Limbus zu Limbus dokumentiert.



**Abb. 7:** Oculus Pentacam® HR  
(<https://www.oculus-onlineshop.de/tomographie/oculus-pentacam-hr.html>)



**Abb. 8:** Erfassen der Schnittbilder  
(<https://www.pentacam.com/int/technology/measurement-principle-licences-network-1.html>)

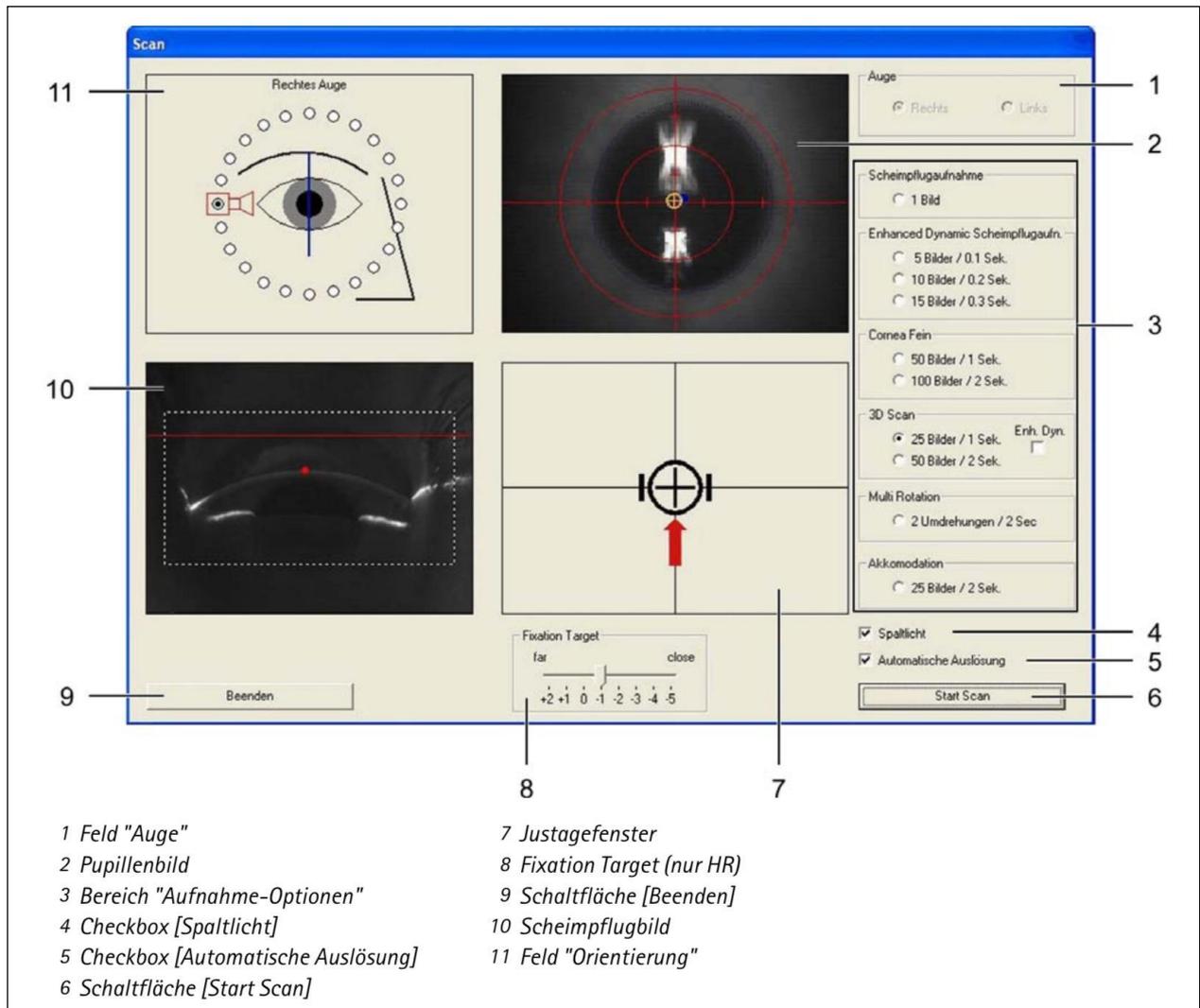
## 2.5 Ablauf der Messung

### 2.5.1 Information der Probanden

Die Messung des vorderen Augenabschnitts erfolgte im abgedunkelten Raum in maximaler Mydriasis. Die Patienten wurden angewiesen, die rot-blinkende Markierung bis zu dem Zeitpunkt zu fixieren bis die Fixationsmarke und das Spaltlicht (blaue Linie) erloschen sind. Die Probanden wurden motiviert, die Fixierung beizubehalten, solange sich die blaue Lichtlinie bewegt.

### 2.5.2 Platzierung der Probanden und Auslösung der Messung

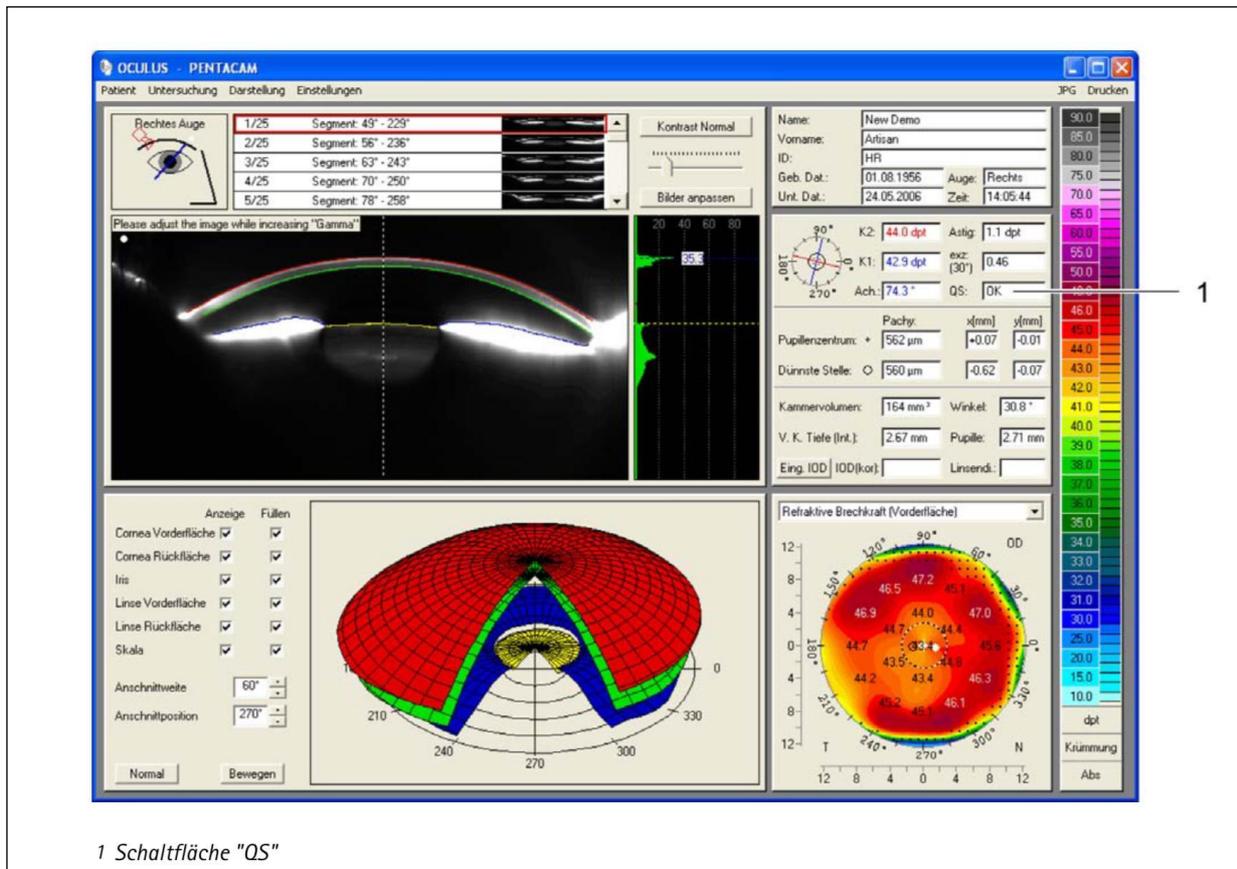
Im Rahmen der erfolgten monokularen Messung ist es bedeutsam, dass die Probanden eine optimale Kopfhaltung einnehmen, indem sie Stirn und Kinn an die dafür vorgesehene Position der Stütze drücken. Um eine störungsfreie Aufnahme sicherzustellen, musste bei Bedarf die Kopfposition gedreht werden, um Artefakte durch Nasen zu verhindern. Mögliche vorhandene Fehlsichtigkeiten der Probanden konnten von +2.00 bis -5.00 Dioptrien ausgeglichen werden. Bei Vorliegen der Hornhaut-Apex-Zentrierung wurde die Messung selbstständig ausgelöst (siehe Abb. 9). Der Untersucher stellt die Kamera mithilfe eines opto-elektronischen Zielsystems auf den Hornhaut Apex ein. Sobald der Apex erreicht ist, löst die Kamera automatisch aus und fertigt die gewünschte Anzahl von Aufnahmen an. Alle Aufnahmen werden elektronisch gespeichert.



**Abb. 9:** Darstellung der Bildaufnahme und der Kameraeinstellung  
 ([https://www.pentacam.com/fileadmin/user\\_upload/pentacam.de/downloads/interpretations-leitfaden/Pentacam\\_Interpretationsleitfaden\\_3rd\\_0218\\_k.pdf](https://www.pentacam.com/fileadmin/user_upload/pentacam.de/downloads/interpretations-leitfaden/Pentacam_Interpretationsleitfaden_3rd_0218_k.pdf))

### 2.5.3 Erste Beurteilung der Messung

Im Anschluss an die Aufnahmen erfolgte eine erste qualitative Beurteilung der erhobenen Daten in der Übersicht (siehe Abb. 10). Hierbei konnten defizitäre Bilder, welche sich vornehmlich durch Lidschlag, Artefakte durch die Nase oder Anatomie der Lidspalte kennzeichnen, unmittelbar verworfen werden. War die Aufnahme ungeeignet, wurden die Probanden erneut instruiert und die Aufnahme wurde wiederholt.



**Abb. 10:** Pentacam®-Programm zur ersten Beurteilung der Daten: Erscheint in der Schaltfläche „QS“ ein OK, ist die Messung einwandfrei und reproduzierbar ([https://www.pentacam.com/fileadmin/user\\_upload/pentacam.de/downloads/interpretation-leitfaden/Pentacam\\_Interpretationsleitfaden\\_3rd\\_0218\\_k.pdf](https://www.pentacam.com/fileadmin/user_upload/pentacam.de/downloads/interpretation-leitfaden/Pentacam_Interpretationsleitfaden_3rd_0218_k.pdf)).

## 2.6 Statistische Methodik

Die in den Messungen erhobenen Daten wurden zunächst durch Anonymisierung der Probanden in Excel-Tabellen aufgenommen. Diese wurden neben dem Kriterium des Geschlechts, nach Alter oder Messorten sortiert.

Zwecks statistischer Auswertung wurde die Statistik- und Analyse-Software SPSS verwendet (Janssen und Laatz, 2016).

Die Daten wurden anhand des t-Tests auf einen Zusammenhang oder Unterschied innerhalb der betrachteten Merkmale getestet. Um der Alpha-Fehler-Kumulierung entgegenzuwirken, fand die Bonferroni-Korrektur Anwendung (Hedderich und Sachs, 2020).

### 3. Ergebnisse

#### 3.1 Probandeneinteilung

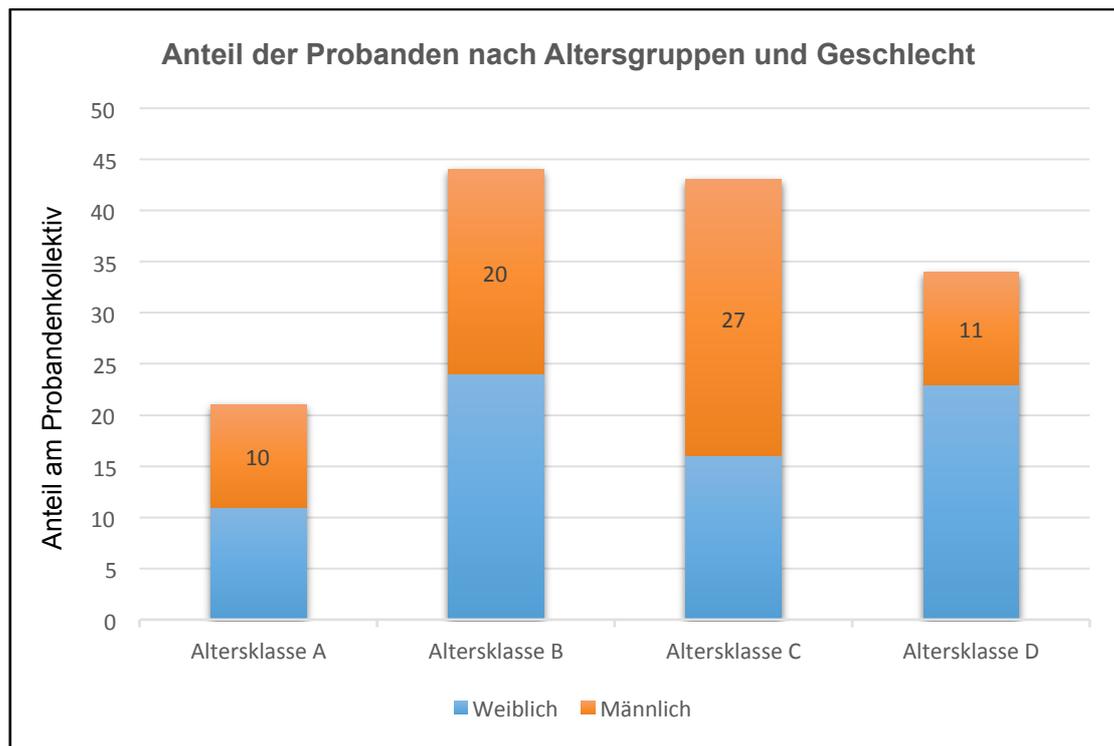
In der vorliegenden Studie wurden 142 Probanden untersucht (siehe Abb. 11). Hiervon waren 74 weiblichen und 68 männlichen Geschlechts.

Die Altersgruppe A (2-5 Jahre) stellt 21 Probanden, bestehend aus 11 weiblichen und 10 männlichen Probanden. Folglich hat diese Gruppe einen Anteil von 14,79 % an der Gesamtzahl der Probanden. Die weiblichen Probanden der Gruppe repräsentieren dabei 7,75 % der Probanden, die männlichen Probanden hingegen 7,04 %.

Die 44 Probanden umfassende Altersgruppe B (6-10 Jahre) stellt einen Anteil von 30,99 % an der absoluten Menge der Probanden dar. Die 24 weiblichen Teilnehmer stehen folglich für 16,9 % der Probanden, die 20 männlichen für 14,08 % der Probanden.

In Altersgruppe C (11-15 Jahre) sind 43 Probanden enthalten, diese stellen 30,28 % der Gesamtzahl dar. Aufgeteilt ist die Gruppe in 16 weibliche und 27 männliche Probanden, dies entspricht 11,27 % bzw. 19,01 % der Gesamtzahl der Probanden.

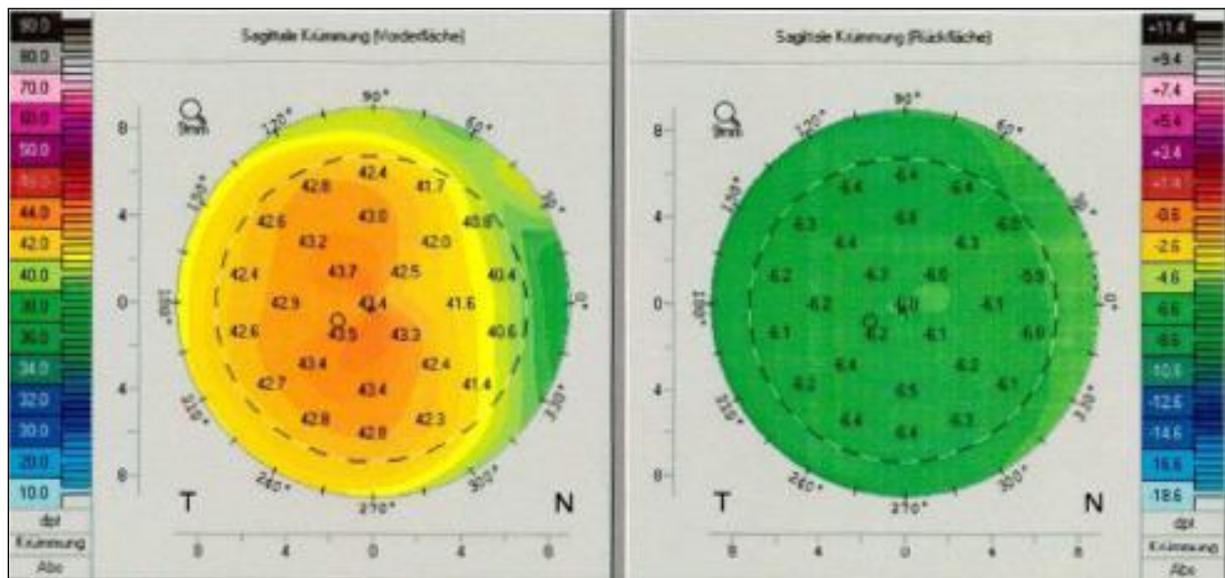
Von den insgesamt 142 Probanden entfielen 34 auf die Altersgruppe D (16-20 Jahre), dies entspricht 23,94 % der Gesamtzahl der Probanden. Die Altersgruppe ist aufgeteilt in 23 weibliche und 11 männliche Probanden, welche für 16,2 % und 7,75 % der Probanden stehen.



**Abb. 11:** Anteil der Probanden nach Altersgruppen und Geschlecht

### 3.2 Dicke der Hornhaut

Mittels Scheimpflug-Aufnahme wurde die Hornhautdicke ermittelt. Die Pachymetrie wurde hierbei an den Messpunkten Zentrum, 0°, 90°, 180° und 270° gemessen (siehe Abb. 12). Die Daten der Augen wurden gespiegelt, damit die Messpunkte übereinstimmen.

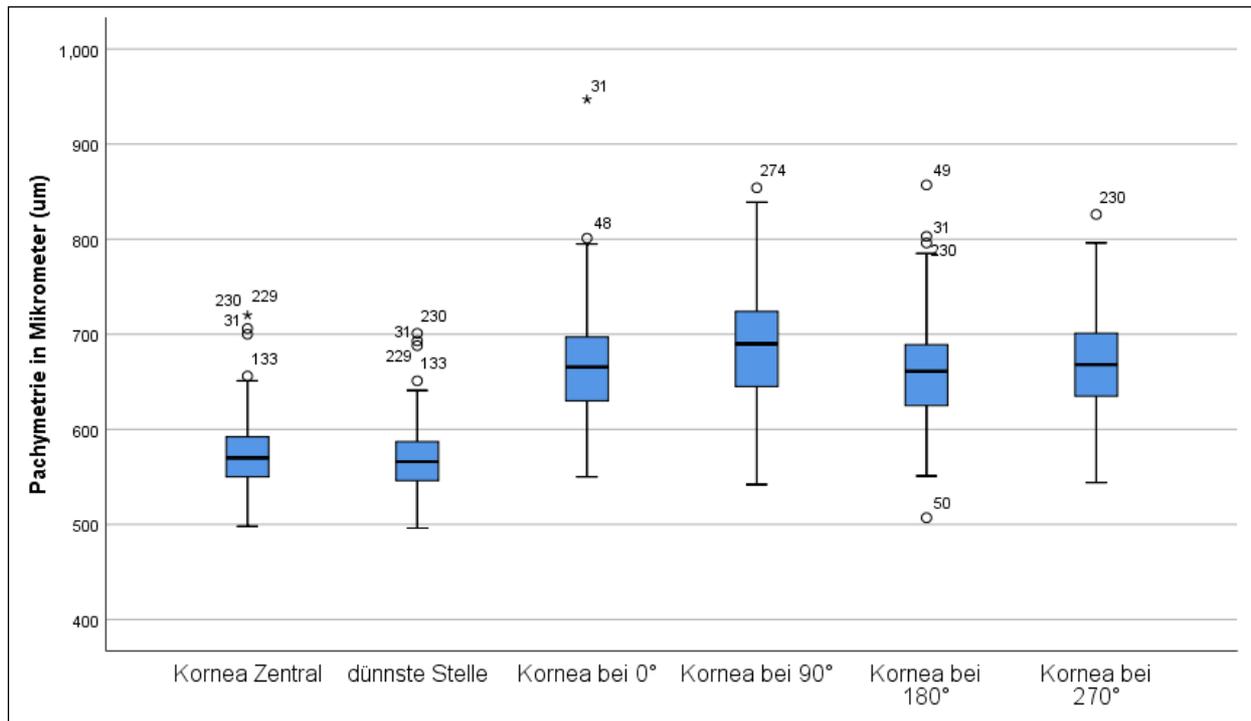


**Abb. 12:** Pachymetrie

([https://www.pentacam.com/fileadmin/user\\_upload/pentacam.de/downloads/interpretations-leitfaden/Pentacam\\_Interpretationsleitfaden\\_3rd\\_0218\\_k.pdf](https://www.pentacam.com/fileadmin/user_upload/pentacam.de/downloads/interpretations-leitfaden/Pentacam_Interpretationsleitfaden_3rd_0218_k.pdf))

Ferner wurde die dünnste Stelle festgestellt. Eine Unterscheidung zwischen weiblichen und männlichen Probanden findet im vorliegenden Abschnitt keine Anwendung.

Die durchschnittliche Hornhautdicke an der zentralen Stelle beträgt 571,48 µm, dabei stellen 598,00 µm und 720,00 µm die minimalsten bzw. maximalsten Dicken dar. Am Messpunkt 0° zeigt sich ein Durchschnitt von 664,47 µm, hierbei repräsentieren 550,00 µm und 947,00 µm das Minimum und Maximum. In der Achse bei 90° zeigt sich das Mittel der Hornhautdicke bei 686,04 µm, während das Minimum und Maximum bei 542,00 µm und 854,00 µm zu verorten sind. Gemessen bei 180° ergeben sich im Durchschnitt eine Dicke der Hornhaut von 659,12 µm sowie ein Minimum von 504,00 µm und ein Maximum von 857,00 µm. Die Pachymetrie bei 270° stellt sich im Mittel bei 667,43 µm dar, im Minimum bei 544,00 µm und im Maximum bei 826,00 µm. Die dünnste Stelle der Hornhaut misst durchschnittlich 567,26 µm mit einem Minimum von 496,00 µm und einem Maximum von 701,00 µm (siehe Abb. 13 und Tab. 1 und 2).



**Abb. 13:** Graphische Darstellung der Pachymetrie

### 3.2.1 Pachymetrie nach Geschlecht

Die durchschnittliche Dicke der Hornhaut im Zentrum beträgt bei Frauen 567,76 µm, hierbei zeigt sich das Minimum bei 498,00 µm, das Maximum bei 720,00 µm. Bei männlichen Probanden stellt sich die durchschnittliche Pachymetrie im Zentrum bei 576,08 µm dar, während 509,00 µm das Minimum und 656,00 µm das Maximum widerspiegeln.

Bei 0° zeigt sich bei den weiblichen Probanden eine Dicke im Mittel von 659,06 µm, wobei das Minimum 552,00 µm und das Maximum 947,00 µm betragen. Die durchschnittliche Dicke der Hornhaut der männlichen Probanden liegt bei 669,75 µm, dabei stellen 550,00 µm und 801,00 µm das Minimum bzw. Maximum dar. Die männlichen Probanden weisen bei 0° eine durchschnittliche Dicke der Hornhaut von 669,75 µm auf, hierbei beträgt das Minimum 550,00 µm und das Maximum 801,00 µm.

Im Messpunkt 90° liegt der Durchschnitt bei den weiblichen Probanden bei 678,20 µm, das Minimum zeigt sich bei 542,00 µm, das Maximum bei 854,00 µm. Männliche Probanden zeigen bei diesem Messpunkt eine durchschnittliche Hornhautdicke von 694,50 µm, dabei liegen Minimum und Maximum bei 580,00 µm und 839,00 µm. Die Pachymetrie bei 180° stellt sich bei den Teilnehmerinnen der Studie im Durchschnitt bei 654,15 µm dar, dabei zeigt sich das Minimum bei 507,00 µm, das Maximum bei 803,00 µm. Dem steht ein Durchschnitt der männlichen Probanden bei 664,34 µm entgegen, wobei das Minimum 551,00 µm und das Maximum 857,00 µm repräsentieren. Der Messpunkt 270° zeigt bei den weiblichen Probanden im Mittel eine Hornhautdicke von 663,22 µm, dabei stellen 565,00 µm das Minimum und 826,00 µm das Maximum dar. An jenem Messpunkt stellt sich das Mittel der Hornhautdicke bei den männlichen Probanden mit 672,15 µm dar, wobei das Minimum 560,00 sowie das Maximum 790,00 µm betragen. In Bezug auf die dünnste Stelle der Hornhaut zeigt sich bei den weiblichen Probanden ein Wert von 562,36 µm, hierbei stellen 449,00 µm und 701,00 µm das Minimum und Maximum dar. Die dünnste Stelle der Hornhaut der männlichen Probanden misst durchschnittlich 572,02 µm, wobei sich ein Minimum von 507,00 µm und ein Maximum von 651,00 µm zeigen.

Folglich ergeben sich im Vergleich der Geschlechter signifikante Unterschiede zwischen den verschiedenen Messpunkten. Weibliche Probanden haben gegenüber männlichen Probanden eine dünnere Hornhaut an zentraler Stelle:  $df(1) = 4.320$ ,  $p = 0.03$ . Des Weiteren stellt sich die Cornea im Messpunkt 90° bei den Teilnehmerinnen signifikant dünner dar:  $F(1) = 5.685$ ,  $p = 0.01$ . Ferner zeigt sich, dass weibliche Probanden in Bezug auf die dünnste Stelle der Hornhaut eine durchschnittlich geringere Dicke aufweisen:  $F(1) = 5.833$ ,  $p = 0.01$ .

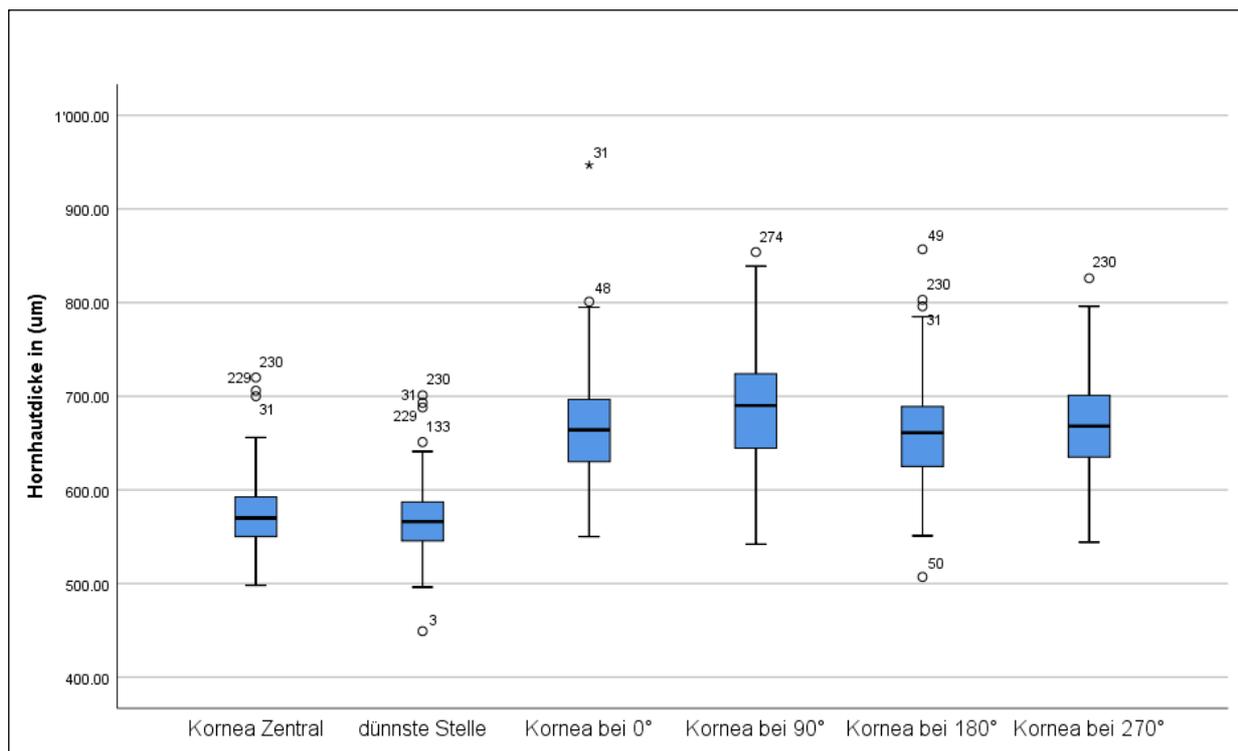
Darüber hinaus ergeben sich hinsichtlich der Messpunkte 0°, 180° und 270° keine erheblichen Unterschiede zwischen weiblichen und männlichen Probanden (siehe Anhang Tab. 3).

### 3.2.2 Pachymetrie nach Altersgruppen

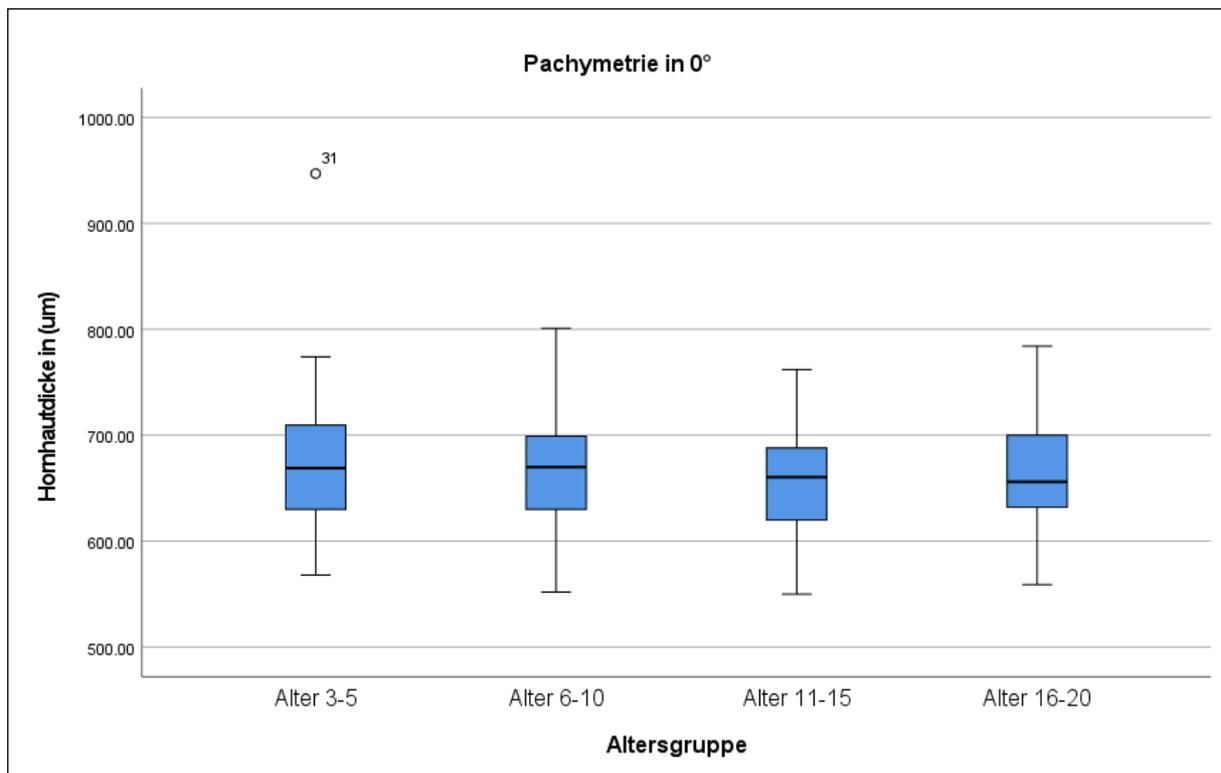
Der nächste Schritt der Auswertung hat die Korrelation von Hornhautdicke und Altersgruppen zum Gegenstand. Die Darstellung erfolgt hierbei mittels Box-Plot-Diagramm. Die Messpunkte geben neben dem Wert der minimalen und maximalen Hornhautdicke auch den Meridian wieder. Innerhalb der Auswertung zeigen sich eine geringe Anzahl an Ausreißern und eine zu vernachlässigende Anzahl an Extremwerten.

Die Daten der zentralen Cornea geben eine signifikante Abweichung der Varianz innerhalb der Altersgruppen wieder. Zur Verifizierung dieses Ergebnisses wurden die Messdaten mithilfe des Brown-Forsythe-Tests korrigiert. Dass sich keine Unterschiede zwischen den Altersgruppen zeigen, konnte im Anschluss bestätigt werden.

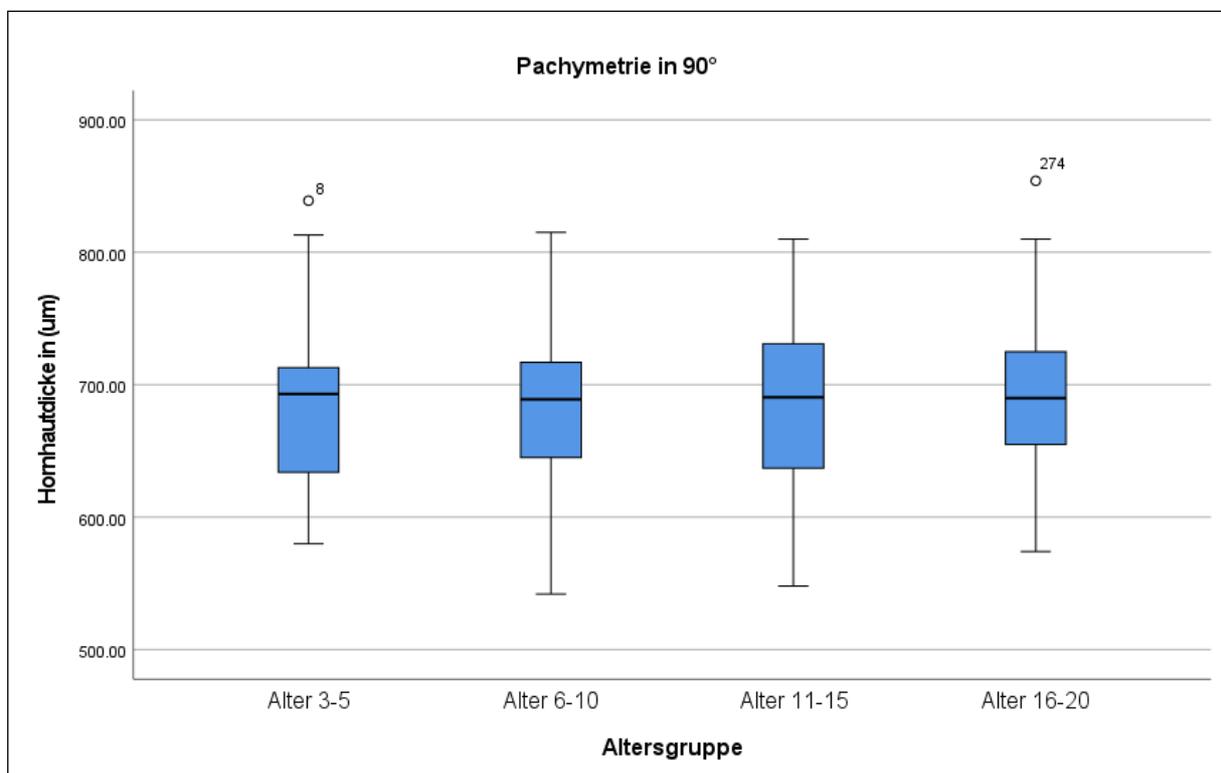
Die Auswertung der anderen Messpunkte ergibt keine Unterschiede der Hornhautdicke zwischen den verschiedenen Altersgruppen (siehe Abb. 14 bis 19).



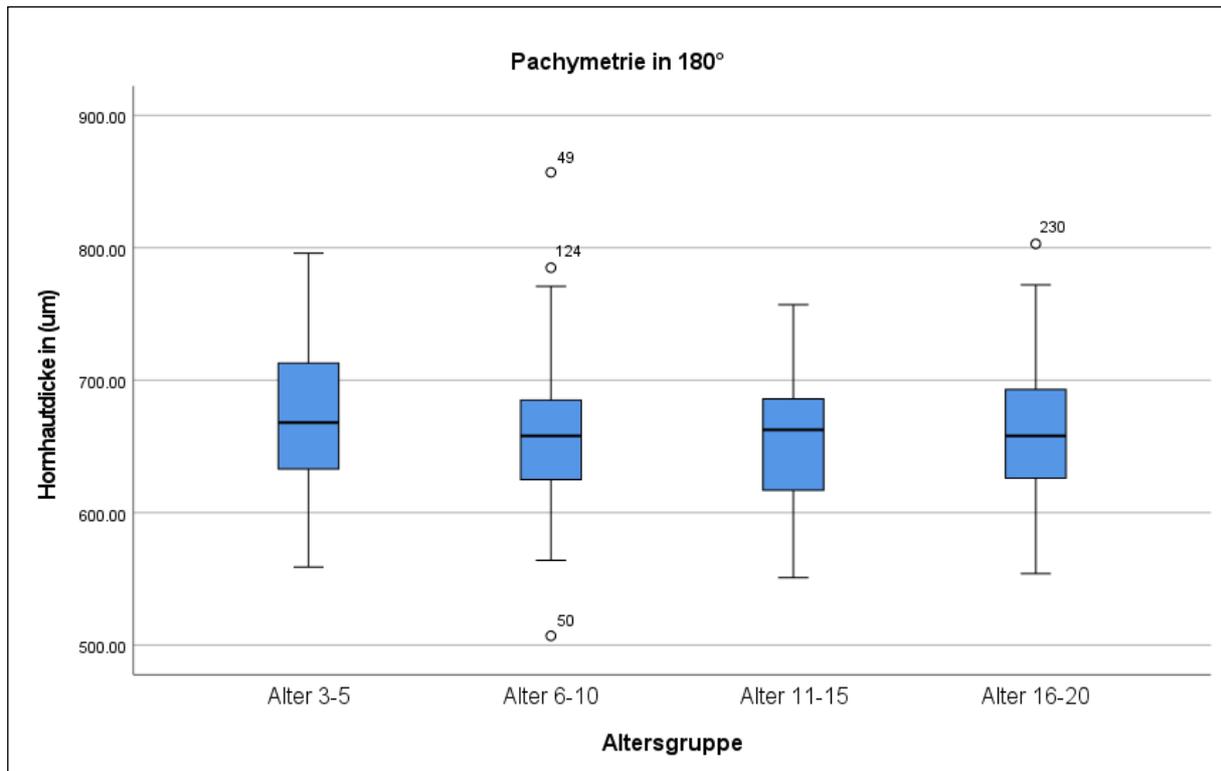
**Abb. 14:** Pachymetrie der zentralen Cornea nach Altersgruppen:  $F(3) = 2.445$ ,  $p = 0.06$



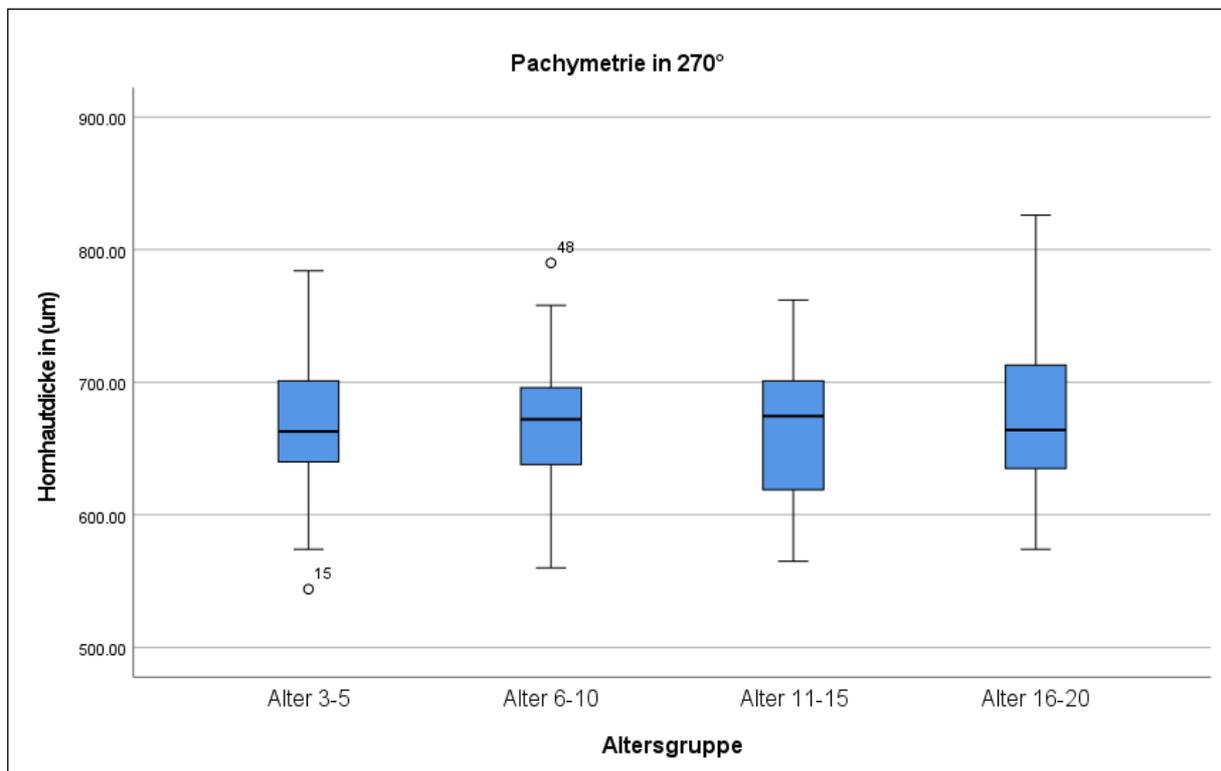
**Abb. 15:** Pachymetrie bei 0° nach Altersgruppen:  $F(3), 1.858, p = 0.13$



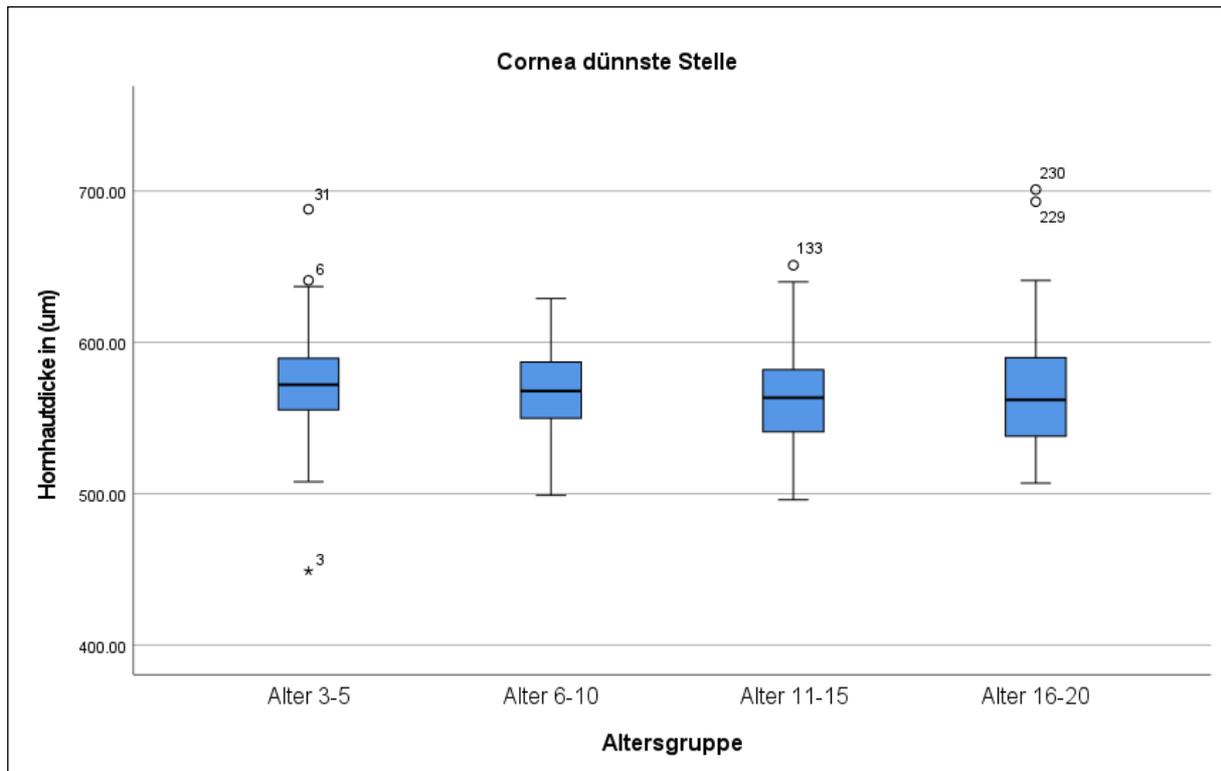
**Abb. 16:** Pachymetrie bei 90° nach Altersgruppen:  $F(3) = 0.658, p = 0.57$



**Abb. 17:** Pachymetrie bei 180° nach Altersgruppen:  $F(3) = 1.703$ ,  $p = 0.16$



**Abb. 18:** Pachymetrie bei 270° nach Altersgruppen:  $F(3) = 0.546$ ,  $p = 0.65$



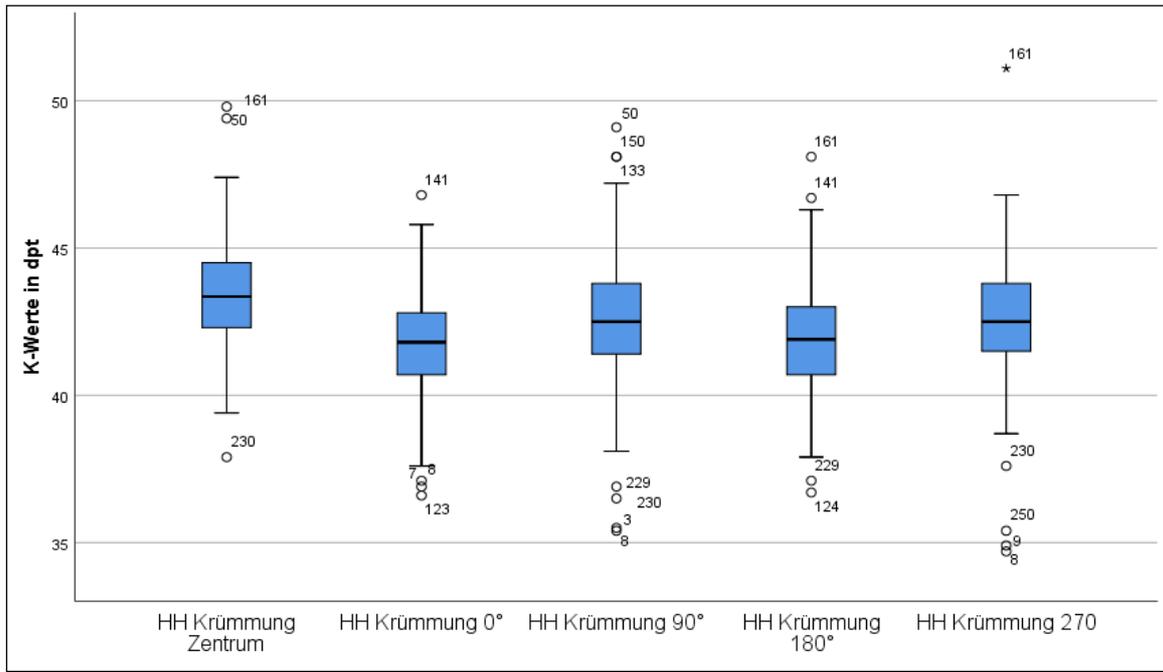
**Abb. 19:** Pachymetrie der dünnsten Stelle nach Altersgruppen:  $F(3) = 0.846$ ,  $p = 0.47$

### 3.3. Hornhautkrümmung

#### 3.3.1 Hornhautkrümmung unabhängig von Geschlecht und Alter

In der weiteren Analyse wurde die Hornhautkrümmung bei den Probanden unabhängig von Geschlecht und Alter ermittelt (siehe Abb. 20). Hierbei ergibt sich im Zentrum eine durchschnittliche Krümmung von 43,41 dpt, dabei zeigt sich das Minimum bei 37,90 dpt, das Maximum bei 49,80 dpt. Beim Messpunkt  $0^\circ$  ergibt sich ein Mittel von 41,75 dpt, hierbei stellen 36,60 dpt und 46,80 dpt das Minimum bzw. Maximum dar. Die Dicke der Hornhaut bei  $90^\circ$  beträgt durchschnittlich 42,66 dpt, während das Minimum bei 35,40 dpt liegt, das Maximum hingegen bei 49,10 dpt. Bei  $180^\circ$  ergibt sich eine durchschnittliche Krümmung der Hornhaut von 41,90 dpt, dabei repräsentieren 36,70 dpt und 48,10 dpt den minimalen bzw. maximalen Wert. In Bezug auf die Messung bei  $270^\circ$  ergibt sich ein

Mittel von 45,52 dpt, dabei spiegeln 34,70 dpt und 51,10 dpt das Minimum und Maximum wider (siehe Anhang Tab. 4 und 5).



**Abb. 20:** Krümmungsradien

### 3.3.2 Hornhautkrümmung nach Geschlecht

Ferner wurde die Hornhautkrümmung in Bezug zum Geschlecht der Probanden ermittelt. In diesem Zusammenhang ergibt sich bei der Cornea im zentralen Punkt für die weiblichen Probanden eine Krümmung von 43,77 dpt, wobei das Minimum 37,90 dpt und das Maximum 49,84 dpt betragen. Am zentralen Punkt der Hornhaut zeigt sich bei den männlichen Probanden eine Krümmung von 43,04 dpt, dabei liegen die minimalen und maximalen Werte bei 39,40 dpt bzw. 49,40 dpt.

Am Messpunkt 0° ergibt sich bei den Teilnehmerinnen der Studie eine durchschnittliche Krümmung von 42,14 dpt, während 37,60 dpt das Minimum und 46,80 dpt das Maximum darstellen.

Die Krümmung der Hornhaut der weiblichen Probanden bei 90° zeigt sich im Mittel bei 43,14 dpt, hierbei repräsentieren 45,40 dpt und 49,10 dpt den minimalen bzw.

maximalen Wert. An diesem Messpunkt ergibt sich für die männlichen Probanden ein Durchschnittswert von 42,17 dpt, mit dem Minimum von 35,50 dpt und dem Maximum von 48,10 dpt.

Bei 180° stellt sich die durchschnittliche Hornhautkrümmung der weiblichen Probanden bei 42,25 dpt ein, dabei spiegeln 37,10 dpt und 46,70 dpt das Minimum und Maximum wider. Hierbei ergibt sich bei den männlichen Probanden ein Durchschnittswert von 41,54 dpt, während das Minimum bei 36,70 dpt liegt, das Maximum bei 48,10 dpt.

Der Messpunkt bei 270° zeichnet sich dadurch aus, dass bei den weiblichen Probanden ein Durchschnitt von 43,04 dpt ermittelt wurde; Minimum und Maximum sind durch 35,40 dpt und 46,80 dpt gekennzeichnet. Bei den männlichen Teilnehmern liegt das Mittel bei 41,98 dpt, hierbei stellen 34,70 dpt und 51,10 dpt die minimalen bzw. maximalen Werte dar.

Die Analyse zeigt eine klare Abhängigkeit der Geschlechter. In allen Messpunkten ergibt sich eine statistische Signifikanz, die sowohl durch den Levene-Test als auch den Brown-Forsythe-Test bestätigt wird: Zentrum  $F(1) = 14.061$ ,  $p \leq 0.001$ ; Krümmung 90°:  $F(1) = 18.153$   $p \leq 0.001$ ; Krümmung 0°:  $F(1) = 17.707$ ,  $p \leq 0.001$ ; Krümmung 180°:  $F(1) = 13.326$   $p \leq 0.001$  und Krümmung 270°:  $F(1) = 24.007$   $p \leq 0.001$  (siehe Anhang Tab. 6). Das bedeutet, dass die Hornhäute der weiblichen Probanden höhere Krümmungen aufweisen als die der männlichen Teilnehmer.

### 3.3.3 Hornhautkrümmung nach Alter

Außerdem wurden die K-Werte nach Alter ermittelt. Im Rahmen der One-Way-ANOVA Auswertung zeigt sich ein Unterschied zwischen den Altersgruppen für die zentrale Krümmung, die Krümmung bei 0°, bei 90° und bei Krümmung 270°. Für die Krümmung bei 180° stellt sich kein Unterschied heraus. Um der Alphafehlerkumulierung entgegenzuwirken, wurde die Bonferroni-Methode angewandt (siehe Anhang Tab. 7). In diesem Zusammenhang wurde mehrfach eine Korrektur zwischen den Altersklassen vorgenommen. Es zeigt sich nur ein signifikanter Unterschied bei der Krümmung in 0° zwischen der Altersgruppe A im Vergleich zur Altersgruppe C,  $p=0,042$ . Die

Altersgruppe C hat hier um 0,82 dpt steilere Radien. Des Weiteren hat Altersgruppe C in 90° 1,03 dpt steilere Radien als Gruppe A,  $p=0,03$ .

Alle anderen Vergleiche ergeben keine Signifikanz,  $p>0,05$ .

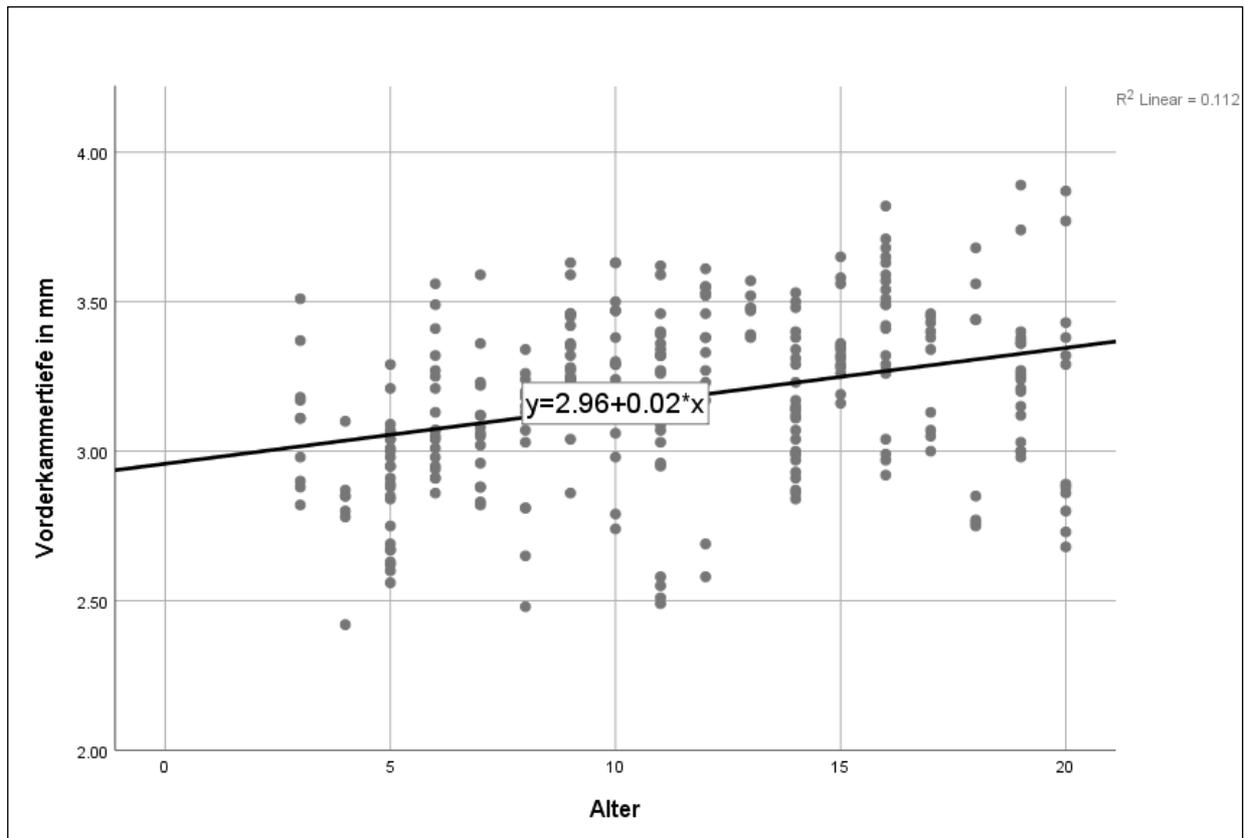
### 3.4 Vorderkammertiefe

#### 3.4.1 Vorderkammertiefe im Vergleich der Geschlechter

Neben den vorgenannten Parametern wurde auch die Vorderkammertiefe (ACD) analysiert. Dabei wurde jeweils der Abstand vom Hornhautendothel zur Linsenvorderfläche gemessen. Die durchschnittliche Vorderkammer hat eine Tiefe von  $3,18 \pm 0,28$  mm (siehe Anhang Tab. 8). In Bezug auf die Geschlechterverteilung zeigt sich bei den männlichen Teilnehmern mit  $3,22 \pm 0,25$  mm eine tiefere Vorderkammer als bei den weiblichen Probanden mit  $3,14 \pm 0,29$  mm,  $F(1) = 6,615$ ,  $p=0,01$ .

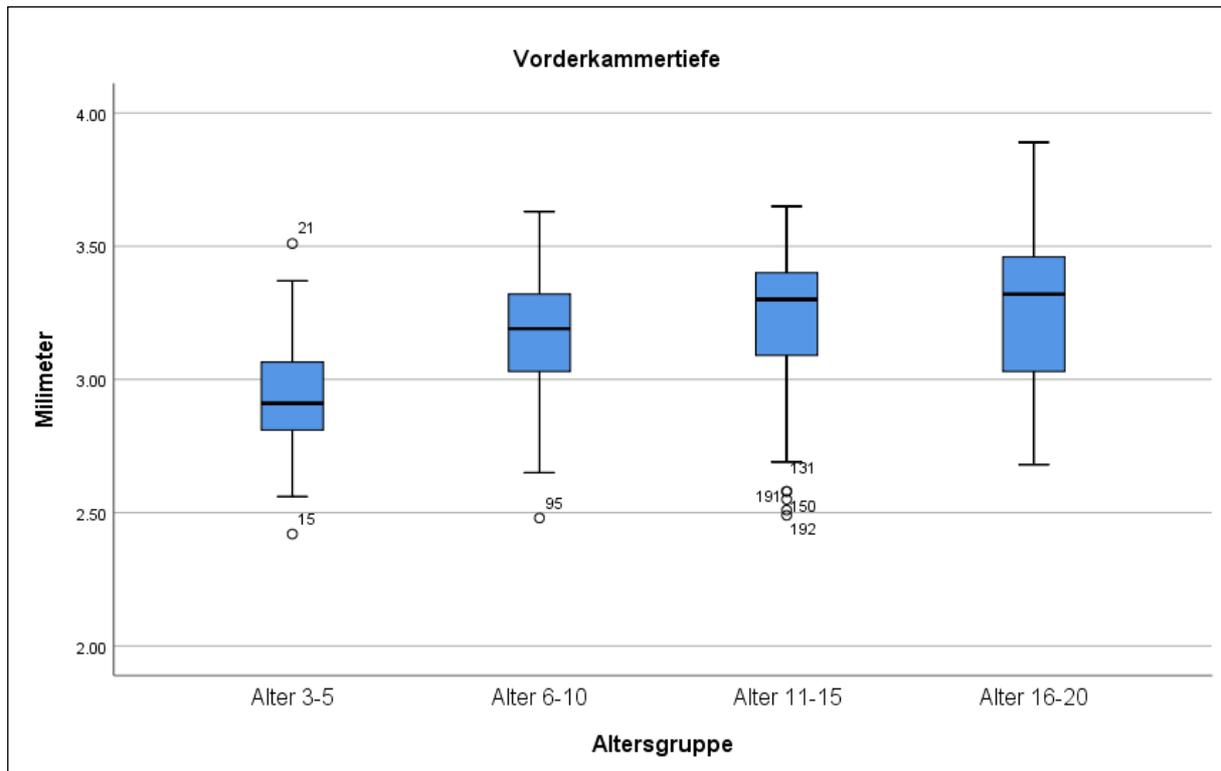
#### 3.4.2 Vorderkammertiefe im Vergleich der Altersgruppen

Die Auswertung der Vorderkammertiefe erfolgte in Bezug auf die verschiedenen Altersgruppen (siehe Abb. 21). Die Darstellung zeigt sich unter anderem als Regressionsgerade. Die Messpunkte zeigen hierbei die entsprechend gemessenen Tiefen eines untersuchten Auges. Die Regressionsgerade ( $y=mx+t$ ) wird durch die Steigung ( $m$ ) und den Schnittpunkt ( $t$ ) mit der Y-Achse definiert. Des Weiteren ist der Korrelationskoeffizient  $R^2$  angegeben.



**Abb. 21:** Vorderkammertiefe nach Altersgruppen

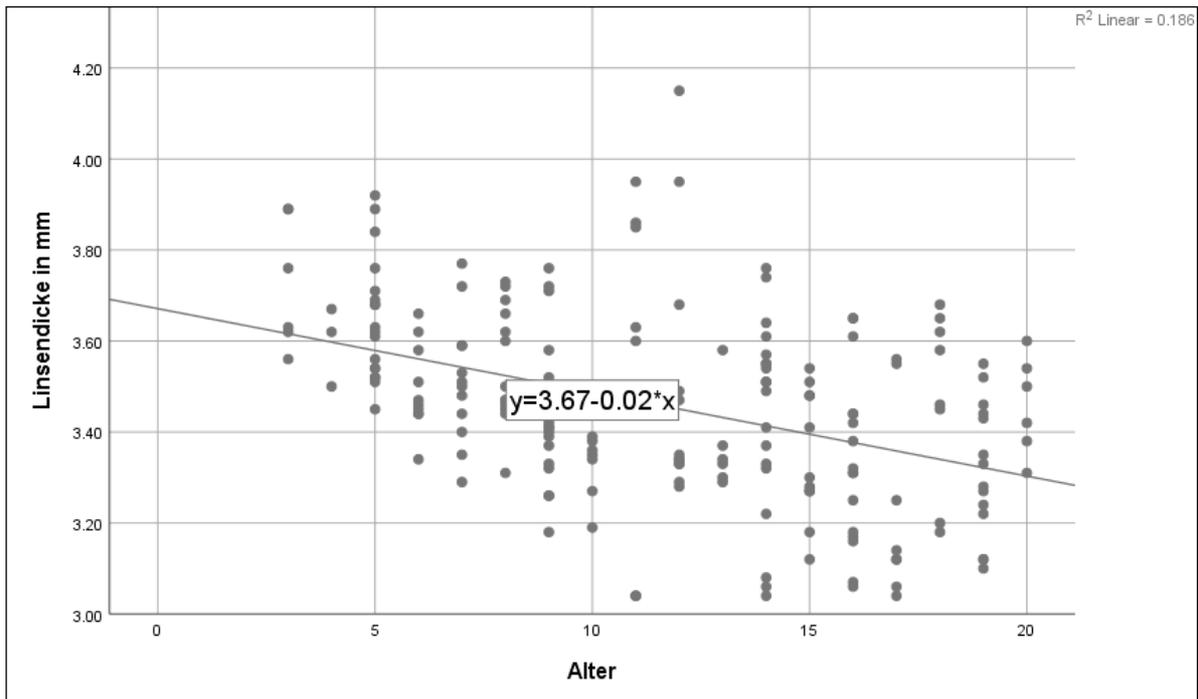
Die ermittelten Daten zeigen eine flachere Vorderkammer in der Altersgruppe A im Vergleich zur Altersgruppe B. Zwischen den anderen Altersgruppen besteht kein Unterschied. Festzuhalten ist, dass die Vorderkammer mit fortschreitendem Alter an Tiefe zunimmt (siehe Abb. 22).



**Abb. 22:** Vorderkammertiefe hinsichtlich Altersgruppen

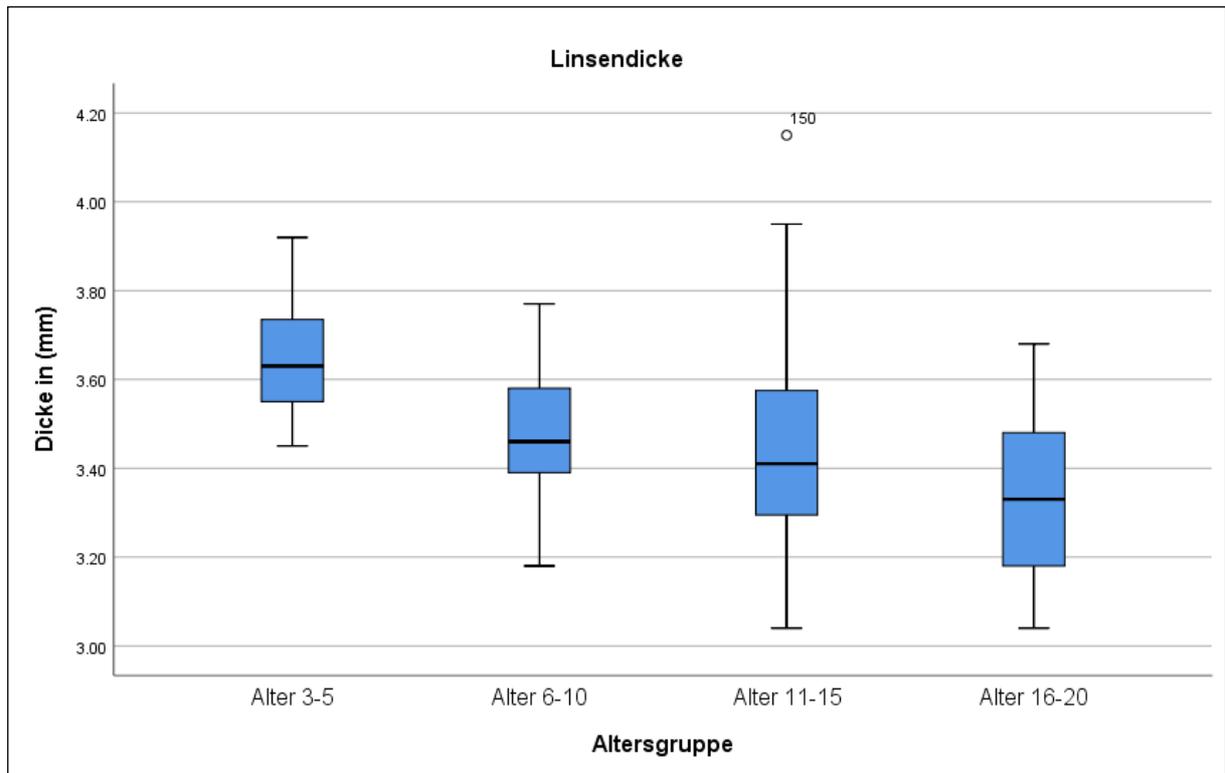
### 3.5 Linsendicke

Abschließendes Merkmal im Rahmen der Aufnahmen war die Linsendicke der Studienteilnehmer. Die durchschnittliche Linsendicke beträgt  $3,45 \pm 0,20$  mm (siehe Anhang Tab. 9). Im Vergleich der Geschlechter zeigt sich hierbei kein Unterschied,  $F(1)1,862$ ,  $p=0,17$ . Im nachfolgenden Scatterplot-Diagramm wird die Beziehung der Linsendicke im Verhältnis zur Altersgruppe sowie mit der dazugehörigen Regressionsgeraden und dem Korrelationskoeffizienten  $R^2$  dargestellt (siehe Abb. 23).



**Abb. 23:** Linsendicke der Probanden

Die Dicke der Linse zeigt sich in der Altersgruppe A signifikant dicker als in Altersgruppe B, +0,18 mm,  $p < 0,001$ . In Relation zu Altersgruppe C ist die Linse von Altersgruppe A um 0,21 mm dicker,  $p < 0,001$ . Ebenso ist die Linse von Altersgruppe A im Vergleich zu Gruppe D um 0,31 mm dicker,  $p < 0,001$ . In Bezug auf die Altersgruppen dieser Studie zeigt sich, dass die Linse mit zunehmendem Alter dünner wird (siehe Abb. 24).



**Abb. 24:** Linsendicke nach Altersgruppen

## 4. Diskussion

In Einklang mit der ausgegebenen Zielsetzung liefern die im Rahmen der Studie erhobenen Daten signifikante Hinweise und Charakteristika zum vorderen Augenabschnitt bei Kindern und Jugendlichen. Einer normativen Betrachtung sehen sich die Merkmale Hornhautdicke, Hornhautkrümmung, Vorderkammertiefe und Linsendicke ausgesetzt.

Die Hornhautdicke betreffend zeigen die erhobenen Daten keine signifikanten Unterschiede zwischen den Altersgruppen. Ein Unterschied ergibt sich in Bezug auf die zentrale Hornhautdicke der weiblichen Probanden, diese stellt sich dünner dar. Hierzu im Widerspruch legen Zheng et al. dar, dass die Hornhautdicke in der Zentrale bei Jungen dicker ist (Zheng et al., 2008).

Verglichen mit anderen Studien bestätigen sich vorliegend die durchschnittlichen Werte der zentralen Hornhaut. Nach Matheus et al. beträgt die Hornhautdicke im Durchschnitt  $553,81 \mu\text{m} \pm 31 \mu\text{m}$  mit einer Range von 481-640  $\mu\text{m}$  (Matheus et al., 2017).

Einerseits wird proklamiert, dass die Dicke der zentralen und parazentralen Hornhaut bei Kindern bis mindestens zum fünften Lebensjahr zunimmt und anschließend bis zum maximal neunten Lebensjahr die Dicke einer Hornhaut eines Erwachsenen erreicht (Hussein et al., 2004; Constantini et al., 2009). Hingegen existieren Ansichten in der Literatur, welche der Annahme der zunehmenden Hornhautdicke mit dem Alter entgegenstehen (Pediatric Eye Disease Investigator Group, 2011). Wiederum als Konsens gilt, dass die Hornhautdicke in einem bestimmten Kindesalter der eines Erwachsenen entspricht. Abhängig von Studie, Größe des untersuchten Kollektivs und vor allem dem Alter weichen die Ergebnisse voneinander ab. Die umfassendste Studie, welche 2079 Kinder mit einer Altersspanne von der Geburt bis zum 17. Lebensjahr zum Gegenstand hat, geht auf die Pediatric Eye Disease Investigator Group zurück.

Notwendiger Erwähnung in Bezug auf den Parameter der Hornhautdicke bedarf die Ethnizität (Dai und Gunderson, 2006). Dass es in Bezug auf die zentrale Hornhautdicke zu Unterschieden zwischen verschiedenen Ethnien kommt, zeigen Dai und Gunderson mit ihren Untersuchungen. Demnach weisen Afroamerikaner mit  $523 \pm 40 \mu\text{m}$  eine dünnere Hornhaut auf als Kaukasier ( $563 \pm 35 \mu\text{m}$ ) und Hispanoamerikaner ( $568 \pm 44$

µm). Das Alter bis 18 Jahre stellt bei den Teilnehmern der Studien ebenso wie das Geschlecht keinen Faktor dar, welcher sich auf die zentrale Hornhautdicke auswirkt. Innerhalb der Ethnie der kaukasischen Europäer zeigen sich bei der Entwicklung der Hornhautdicke Abweichungen im Zusammenhang mit der aufgeführten kindlichen Altersspanne (Doughty et al., 2002). Gegenstand der vorliegenden Studie waren nur Teilnehmer kaukasischer Ethnie.

Die Messung der Hornhautdicke ist ebenso essentiell für die Diagnose und Beurteilung von multiplen Augen- und Hornhauterkrankungen wie für die Überwachung bestimmter Pathologien.

Angesichts ihrer Bedeutung für die Formgebung der Hornhaut ist das Merkmal der Hornhautkrümmung zu beleuchten. Frühzeitige ektatische Veränderungen sind schwierig von einer physiologischen Krümmung zu unterscheiden, da physiologisch altersbedingte Veränderungen der Hornhautdicke und Hornhautkrümmung nicht ausreichend spezifisch untersucht sind. Dass die vordere Hornhautkrümmung mit dem Alter korreliert, wird zum Teil bejaht, mitunter aber auch negiert (Prasad et al., 2011; Rüfer et al., 2007; Tong et al., 2020). Ebenso besteht kein Konsens in Bezug auf das Vorliegen systematischer Korrelationen zwischen Hornhautparametern und anderen demografischen Faktoren wie Geschlecht, ethnischer Zugehörigkeit und Refraktionsfehlern (Orucoglu et al., 2015; Aghaian, 2004; Khoramnia, 2007).

Messschwankungen, welche üblicherweise aufgrund von Interindividualität auftreten, tragen wiederum dazu bei, dass es zu Widersprüchen in statistischen Tests und Beeinträchtigungen von reproduzierbaren Analysen kommt (Yoshioka, et al., 2017). Im Kontext dieser Aussage sind die Ergebnisse der vorliegenden Studie zu betrachten, welche eine deutliche Abhängigkeit der Geschlechter verzeichnen. Die weiblichen Probanden weisen im Gegensatz zu den männlichen eine signifikant steilere Hornhaut auf. Unabhängig vom Geschlecht zeigt sich in der Altersgruppe von 11-15 Jahren eine steilere Hornhaut als in den anderen Probandengruppen. Ob eine Studie mit einer erheblich größeren Teilnehmerzahl zu verallgemeinerungswürdigeren Ergebnissen führen würde, lässt sich aufgrund der gezeigten Problematik der Interindividualität nicht konstatieren.

Die Hornhautkrümmung stellt einen Faktor dar, der den Astigmatismus mit bestimmt (Read et al., 2007). Steilere Hornhautradien bilden einen Indikator für eine etwaige Amblyopie (Abrahamsson und Sjöstrand, 2003). Weitere Studien zeigen auf, dass die Krümmungsradien der Hornhaut eine Myopie begünstigen (Zhao et al., 2019).

Da die Hornhaut an der Refraktion beteiligt ist, haben etwaige Änderungen der Hornhautkrümmung Einfluss auf die Qualität der retinalen Abbildung. Gemäß den Ausführungen von Gunton et al. resultiert die Emmetropie im Kindesalter aus einem Zusammenspiel von Hornhautkrümmung, Änderungen der Linse und der axialen Länge des Auges (Gunton et al., 2005).

Ferner legen die Autoren dar, dass die Krümmungsradien bei Säuglingen steiler sind als bei Erwachsenen. Die Hornhaut wird bereits flacher in den ersten zwei bis vier Lebenswochen der Säuglinge. Dieser Prozess verlangsamt sich nach acht Lebenswochen. Entsprechend den Ausführungen in der Literatur liegt die Verkrümmung statistisch bei 47 bis 48 Dioptrien (Insler et al., 1987). Im Vergleich zu Jungen weisen Mädchen in jedem Alter eine statistisch signifikant steilere Hornhaut auf.

Dieses Ergebnis wird auch durch die vorliegende Studie manifestiert. Im Altersvergleich zeigen sich in der Gruppe der 11- bis 15-Jährigen teilweise steilere Radien als bei den Probanden der Gruppe A (den 2- bis 5-Jährigen). Diese Entwicklung kann relativierend im Rahmen des normalen Abflachungsprozesses gewertet werden.

Wird ein größeres Patientenkollektiv untersucht, muss bei der Interpretation der normativen Daten die Ethnizität ausdrücklich berücksichtigt werden. Die Abflachung der Hornhautradien ist in der zweiten bis frühen dritten Lebensdekade abgeschlossen.

Der untersuchte Parameter der Vorderkammertiefe wird durch Faktoren wie das Sklera-Wachstum und die Linsendicke beeinflusst (Drexler et al., 1997). Es gibt diverse Methoden, die Tiefe der Vorderkammer zu messen; beispielhaft zu nennen sind die Scheimpflug-Fotografie, die Ultraschall-Biometrie und die Messung mittels eines Ophthalmometers. In Abhängigkeit der gewählten Methode ergeben sich durchschnittliche Werte von 2,05 mm mit einer Schwankung von 1,8 bis 2,4 mm (Gunton et al., 2005). In der hier zu Grunde liegenden Studie betragen die Durchschnittswerte  $3,45 \pm 0,20$  mm. Anzumerken ist, dass je nach angewandter Messtechnik die

Vorderkammertiefe abnehmen kann, da diese durch die physiologische Akkommodation als auch durch die Messung in medikamentöser Mydriase beeinflusst werden kann.

Gemäß Kashima et al. sind die Tiefe der Vorderkammer als auch die Linsendicke mit der Zunahme des Alters assoziiert. Die Aussagekraft wird im Vergleich zur vorliegenden Studie begrenzt, da bei Kashima et al. das Probandenalter 9-80 Jahre beträgt (Kashima et al., 1993).

In Bezug auf das Merkmal der Linsendicke ist gemäß Duncan et al. festzuhalten, dass die Linse über die gesamte Lebensspanne einer Entwicklung hinsichtlich verschiedener Faktoren unterliegt (Duncan et al., 1997). Insbesondere muss sich die Linse im Entwicklungsprozess am meisten an die sich ändernde Achsenlänge des Auges anpassen (Iribarren, 2015).

Verschiedene Autoren haben die Fähigkeit der Linse zur strukturellen, molekularen und geometrischen Veränderungen herangezogen, um die Eigenschaft der Linse, ihre Brechkraft zu verändern, darzulegen (Bours und Födisch, 1986). Aufgrund des äquatorialen Wachstums des Auges, das die Linse im Wesentlichen dehnt, kommt es in den ersten drei Lebensjahren zu einer Abnahme der Linsendicke (Mutti et al., 2005).

Bei der Wachstumsrate der Linse gibt es ebenso wenig geschlechtsspezifische Unterschiede wie bei der Linsendicke, dies gilt unabhängig vom Alter der Jungen und Mädchen. Im Alter von 6 Jahren variiert die Linsendicke je nach ethnischer Zugehörigkeit zwischen 3,5 und 3,6 mm. Unbeeinflusst von der Ethnie nimmt die Dicke der Linse im Alter von 11-13 Jahren ab, im Anschluss legt die Linsendicke allmählich zu.

In Bezug auf die Linsendicke besteht insbesondere eine signifikante positive Korrelation zwischen zunehmendem Alter und Dichte sowie Dicke der Linse (Kashima et al., 1993).

Uneinheitliche Ergebnisse zeigen sich in puncto Linsendicke. Während bei der vorliegenden Studie kein Unterschied zwischen den Geschlechtern resultiert, bringt die Studie von Lu et al. zum Ausdruck, dass die weiblichen Probanden eine signifikant dickere Linse im Vergleich zu den männlichen Teilnehmern aufweisen (Lu et al., 2021). Gunton et al. wiederum konstatieren, dass keine geschlechtsspezifischen Unterschiede hinsichtlich der Linsendicke existieren, unabhängig vom Alter der Mädchen und Jungen (Gunton et al., 2005).

Dass mit dem Alter eine Veränderung der Linsendicke einhergeht, wird in diversen Studien verschiedener Autoren beschrieben (Goldmann und Niesel, 1964). Die Werte der gegenwärtigen Studie bestätigen diese Annahme vollumfänglich.

## **5. Zusammenfassung**

Der vorliegenden Dissertationsschrift liegt eine Studie zugrunde, welche die Vermessung des vorderen Augenabschnitts bei Kindern und Jugendlichen in Bezug auf geometrische und densitometrische Daten zum Gegenstand hat. Ihre Rechtfertigung findet die Studie in dem Umstand, dass die Datenlage zum vorderen Augenabschnitt bei Kindern und Jugendlichen weder quantitativ noch qualitativ der des adulten Patientenkollektivs entspricht. Infolge bestand die Aufgabe zunächst darin, aussagekräftige Daten zu erheben. Hierfür wurden Aufnahmen des vorderen Augenabschnitts mittels Pentacam® HR, basierend auf den Scheimpflug-Regeln, erstellt. Im Anschluss wurden die gewonnenen Daten bewertet und entsprechenden Schlussfolgerungen zugeführt.

Die 142 Probanden wurden hinsichtlich der Merkmale Hornhautdicke, Hornhautkrümmung, Vorderkammertiefe und Linsendicke untersucht. Die genannten Kriterien unterlagen einer Betrachtung hinsichtlich Alter und Geschlecht. Die Hornhautdicke betreffend zeigen sich keine signifikanten Unterschiede zwischen den Altersgruppen. Hingegen offenbart sich bei dem Kriterium des Geschlechts, dass die zentrale Hornhautdicke der weiblichen Probanden dünner ist als die der männlichen. Während die Altersgruppen A (2-5 Jahre), B (6-10 Jahre) und D (16-20 Jahre) keine Unterschiede zeigen, weisen die Probanden der Altersgruppe C (11-15 Jahre) eine steilere Hornhaut auf. Die weiblichen Probanden haben altersunabhängig eine steilere Hornhaut als die männlichen Teilnehmer der Studie. In Bezug auf das Verhältnis von Vorderkammertiefe und Alter ist festzuhalten, dass diese mit fortschreitendem Alter zunimmt. Die Vorderkammer der männlichen Teilnehmer ist tiefer als die der weiblichen. In puncto Linsendicke ist zu konstatieren, dass die Linse mit fortschreitender Entwicklung abnimmt, d.h. die Probanden der Altersgruppe A haben die größte

Linsendicke, während die Teilnehmer der Altersgruppe D die dünnsten Linsen aufweisen. Das Merkmal des Geschlechts zeigt keinen Einfluss auf die Dicke der Linse.

Mit den Ergebnissen der Studie geht zunächst die Kenntnis einher, dass die Pentacam-Aufnahmen ein probates Mittel zur Ermittlung von Standard- bzw. Referenzwerten darstellen. Der erhebliche technische Fortschritt findet somit Ausdruck in der Pentacam-Studie und offenbart die Möglichkeit, Befunde akkurat zu analysieren und zu definieren.

Die erhobenen Daten lassen zudem verallgemeinerungswürdige Schlussfolgerungen zu den untersuchten Merkmalen zu, da sich diese im Gros in Studien anderer Autoren widerspiegeln. Darüber hinaus können die Daten und Ergebnisse dieser Studie als Grundlage dienen, um in zukünftigen und umfangreicheren Studien als Referenz herangezogen zu werden. Ferner kann die Kenntnis von Normwerten im klinischen Alltag der Augenheilkunde bedeutsam sein, beispielsweise bei der Berechnung von Kunstlinsen im Falle kindlicher Katarakte.

Im Ergebnis hat die Studie zur Vermessung des vorderen Augenabschnitts bei Kindern und Jugendlichen in Bezug auf geometrische und densitometrische Daten das Bedürfnis nach einer gesicherten Datenlage ebenso offenbart wie beantwortet.

## 6. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Anatomie des menschlichen Auges	S. 8
Abbildung 2: Anzahl der Probanden nach Altersgruppen	S. 13
Abbildung 3: Einverständniserklärung der Probanden	S. 14
Abbildung 4: Theodor Scheimpflug	S. 17
Abbildung 5: Normalfall, wenn Schärfebereich parallel zur Filmebene liegt	S. 18
Abbildung 6: Aufnahme nach dem Scheimpflug-Prinzip	S. 18
Abbildung 7: Oculus Pentacam® HR	S. 20
Abbildung 8: Erfassen der Schnittbilder	S. 20
Abbildung 9: Darstellung der Bildauslösung	S. 22
Abbildung 10: Erste Beurteilung der Daten	S. 23
Abbildung 11: Anteil der Probanden nach Altersgruppen und Geschlecht	S. 25
Abbildung 12: Pachymetrie	S. 26
Abbildung 13: Graphische Darstellung der Pachymetrie	S. 27
Abbildung 14: Pachymetrie der zentralen Cornea nach Altersgruppen	S. 29
Abbildung 15: Pachymetrie bei 0° nach Altersgruppen	S. 30
Abbildung 16: Pachymetrie bei 90° nach Altersgruppen	S. 30
Abbildung 17: Pachymetrie bei 180° nach Altersgruppen	S. 31
Abbildung 18: Pachymetrie bei 270° nach Altersgruppen	S. 31
Abbildung 19: Pachymetrie der dünnsten Stelle nach Altersgruppen	S. 32
Abbildung 20: Krümmungsradien	S. 33
Abbildung 21: Vorderkammertiefe nach Altersgruppen	S. 36

Abbildung 22: Vorderkammertiefe hinsichtlich Altersgruppen	S. 37
Abbildung 23: Linsendicke der Probanden	S. 38
Abbildung 24: Linsendicke nach Altersgruppen	S. 39

## 7. Tabellenverzeichnis

**Tabelle 1:** Pachymetrie aller Probanden

	Durchschnitt	Standard- abweichung	95%-Konfidenzintervall		Minimum	Maximum
			Untere Grenze	Obere Grenze		
Kornea Zentrum	571.48	33.80	567.52	575.45	498.00	720.00
Dünnste Stelle	567.26	33.31	563.26	571.16	496.00	701.00
Pachymetrie 0°	664.47	52.15	658.36	670.58	550.00	947.00
Pachymetrie 90°	686.04	57.96	679.24	692.24	542.00	854.00
Pachymetrie 180°	659.12	50.40	653.21	665.02	504.00	857.00
Pachymetrie 270°	667.43	48.66	661.43	672.83	544.00	826.00

**Tabelle 2:** Perzentile Darstellung der Pachymetrie

		Perzentile						
		Perzentile						
		5	10	25	50	75	90	95
Gewichteter Mittelwert (Definition 1)	HH Zentral	521.2000	531.4000	550.000	570.0000	593.0000	613.0000	627.0000
	Dünnste Stelle	518.0000	525.4000	545.0000	566.0000	587.0000	611.0000	623.8000
	HH Pachymetrie bei 0°	579.2000	594.0000	630.0000	664.0000	697.0000	728.0000	744.8000
	HH Pachymetrie bei 90°	586.8000	606.0000	644.0000	690.0000	724.0000	757.6000	787.0000
	HH Pachymetrie bei 180°	578.6000	598.0000	624.7500	661.0000	689.0000	721.4000	737.8500
	HH Pachymetrie bei 270°	580.1500	603.3000	635.0000	668.0000	701.2500	722.7000	747.5500
Tukey's Hinges	HH Zentral			550.0000	570.0000	592.5000		
	Dünnste Stelle			545.5000	566.0000	587.0000		
	HH Pachymetrie bei 0°			630.0000	664.0000	696.5000		
	HH Pachymetrie bei 90°			644.5000	690.0000	724.0000		
	HH Pachymetrie bei 180°			625.0000	661.0000	689.0000		
	HH Pachymetrie bei 270°			635.0000	668.0000	701.0000		

Tabelle 3: Beschreibende Daten Vergleich Mann – Frau

Beschreibende Daten Vergleich Mann - Frau									
		Gesamt- anzahl (N)	Mittel- wert	Standard- abweichung	Standard- fehler	95%-Konfidenzintervall		Minimum	Maximum
						Untere Grenze	Obere Grenze		
HH Zentral	Weiblich	145	567,76	35,53	2,95	561,93	573,59	498	720
	Männlich	137	576,08	31,43	2,69	570,77	581,39	509	656
	Gesamt	282	571,8	33,8	2,01	567,84	575,76	498	720
dünnste Stelle	Weiblich	145	562,36	35,36	2,94	556,55	568,16	449	701
	Männlich	137	572,02	31,59	2,7	566,69	577,36	507	651
	Gesamt	282	567,05	33,87	2,02	563,08	571,02	449	701
HH Pachy bei 0°	Weiblich	145	659,06	55,87	4,64	649,89	668,23	552	947
	Männlich	137	669,75	48,12	4,11	661,62	677,88	550	801
	Gesamt	282	664,26	52,43	3,12	658,11	670,4	550	947
HH Pachy bei 90°	Weiblich	145	678,2	59,3	4,92	668,47	687,93	542	854
	Männlich	137	694,5	55,3	4,72	685,16	703,85	580	839
	Gesamt	282	686,12	57,86	3,45	679,34	692,9	542	854
HH Pachy bei 180°	Weiblich	144	654,15	52,36	4,36	645,52	662,77	507	803
	Männlich	137	664,34	48,1	4,11	656,22	672,47	551	857
	Gesamt	281	659,12	50,5	3,01	653,19	665,05	507	857
HH Pachy bei 270°	Weiblich	144	663,22	48,87	4,07	655,17	671,27	565	826
	Männlich	137	672,15	47,21	4,03	664,18	680,13	560	790
	Gesamt	281	667,57	48,19	2,87	661,91	673,23	560	826

**Tabelle 4:** K-Werte des gesamten Patientenkollektivs

<b>K-Werte des gesamten Patientenkollektivs</b>						
	Durchschnitt	Standard- abweichung	95%-Konfidenzintervall		Minimum	Maximum
			Untere Grenze	Obere Grenze		
Zentrum	43.41	1.66	43.21	43.61	37.90	49.80
Bei 0°	41.75	1.62	41.56	41.56	36.60	46.80
Bei 90°	42.66	1.97	42.43	42.67	35.40	49.10
Bei 180°	41.90	1.66	41.70	42.09	36.70	48.10
Bei 270°	42.52	1.86	42.30	42.74	34.70	51.10

**Tabelle 5:** K-Werte Perzentile

<b>K-Werte Perzentile</b>								
		Perzentile						
		5	10	25	50	75	90	95
Weighted Average (Definition 1)	HH Krümmung Zentrum	40.70	41.30	42.30	43.35	44.50	45.50	45.90
	HH Krümmung 0°	38.92	39.90	40.70	41.80	42.80	43.70	44.49
	HH Krümmung 90°	39.82	40.63	41.40	42.50	43.80	45.20	45.97
	HH Krümmung 180°	39.20	40.00	40.70	41.90	43.00	44.00	44.49
	HH Krümmung 270°	39.50	40.40	41.50	42.50	43.80	44.50	45.39

**Tabelle 6: K-Werte im Vergleich der weiblichen und männlichen Probanden**

K-Werte im Vergleich der weiblichen und männlichen Probanden									
		Gesamt- anzahl (N)	Durchschnitt	Standard- abweichung	Standard- fehler	95%-Konfidenzintervall		Minimum	Maximum
						Untere Grenze	Obere Grenze		
HH Krümmung Zentrum	Weiblich	145	437.697	174.449	0.14487	434.833	440.560	37.90	49.80
	Männlich	136	430.382	150.727	0.12925	427.826	432.938	39.40	49.40
	Gesamt	281	434.157	167.169	0.09972	432.194	436.120	37.90	49.80
HH Krümmung 0°	Weiblich	145	421.400	162.606	0.13504	418.731	424.069	37.60	46.80
	Männlich	136	413.478	152.315	0.13061	410.895	416.061	36.60	45.30
	Gesamt	281	417.566	162.348	0.09685	415.659	419.472	36.60	46.80
HH Krümmung 90°	Weiblich	145	431.400	212.143	0.17618	427.918	434.882	35.40	49.10
	Männlich	136	421.699	168.225	0.14425	418.846	424.551	35.50	48.10
	Gesamt	281	426.705	197.860	0.11803	424.381	429.028	35.40	49.10
HH Krümmung 180°	Weiblich	144	422.535	168.912	0.14076	419.752	425.317	37.10	46.70
	Männlich	136	415.397	157.618	0.13516	412.724	418.070	36.70	48.10
	Gesamt	280	419.068	167.098	0.09986	417.102	421.034	36.70	48.10
HH Krümmung 270°	Weiblich	144	430.375	180.504	0.15042	427.402	433.348	35.40	46.80
	Männlich	136	419.846	178.897	0.15340	416.812	422.879	34.70	51.10
	Gesamt	280	425.261	186.989	0.11175	423.061	427.460	34.70	51.10

**Tabelle 7:** Hornhautkrümmung nach Alter: Zentrum und 0°

Mehrfachvergleiche nach Bonferroni							
Abhängige Variable			Mittelwert-differenz (I-J)	Standard-fehler	Signifikanz	95%-Konfidenzintervall	
						Untere Grenze	Obere Grenze
HH Krümmung Zentrum	Alter 3-5	alter 6-10	0,34969	0,31126	1	-0,4774	1,1768
		alter 11-15	-0,30177	0,31066	1	-1,1273	0,5237
		alter 16-20	0,39193	0,32298	1	-0,4663	1,2502
	alter 6-10	Alter 3-5	-0,34969	0,31126	1	-1,1768	0,4774
		alter 11-15	-0,65146	0,2524	0,062	-1,3222	0,0192
		alter 16-20	0,04223	0,26741	1	-0,6684	0,7528
	alter 11-15	Alter 3-5	0,30177	0,31066	1	-0,5237	1,1273
		alter 6-10	0,65146	0,2524	0,062	-0,0192	1,3222
		alter 16-20	0,6937	0,26672	0,059	-0,015	1,4024
	alter 16-20	Alter 3-5	-0,39193	0,32298	1	-1,2502	0,4663
		alter 6-10	-0,04223	0,26741	1	-0,7528	0,6684
		alter 11-15	-0,6937	0,26672	0,059	-1,4024	0,015
HH Krümmung 0°	Alter 3-5	alter 6-10	-0,42328	0,30239	0,976	-1,2268	0,3802
		alter 11-15	<b>-0,81927*</b>	<b>0,30181</b>	<b>0,042</b>	-1,6212	-0,0173
		alter 16-20	-0,23219	0,31377	1	-1,066	0,6016
	alter 6-10	Alter 3-5	0,42328	0,30239	0,976	-0,3802	1,2268
		alter 11-15	-0,39599	0,24521	0,645	-1,0476	0,2556
		alter 16-20	0,19108	0,25979	1	-0,4993	0,8814
	alter 11-15	Alter 3-5	<b>0,81927*</b>	<b>0,30181</b>	<b>0,042</b>	0,0173	1,6212
		alter 6-10	0,39599	0,24521	0,645	-0,2556	1,0476
		alter 16-20	0,58707	0,25911	0,145	-0,1015	1,2756
	alter 16-20	Alter 3-5	0,23219	0,31377	1	-0,6016	1,066
		alter 6-10	-0,19108	0,25979	1	-0,8814	0,4993
		alter 11-15	-0,58707	0,25911	0,145	-1,2756	0,1015

\*Der mittlere Unterschied ist auf dem Niveau von 0,05 signifikant

**Tabelle 8:** Hornhautkrümmung nach Alter: 90°, 180° und 270°

Mehrfachvergleiche nach Bonferroni							
Abhängige Variable		Mittelwert- differenz (I-J)	Standard- fehler	Signifikanz	95%-Konfidenzintervall		
					Grenze	Grenze	
HH Krümmung 90°	Alter 3-5	Alter 6-10	-0,43384	0,36852	1	-1,4131	0,5454
		Alter 11-15	-1,02968*	0,36781	0,033	-2,007	-0,0523
		Alter 16-20	-0,41387	0,38239	1	-1,43	0,6022
	Alter 6-10	Alter 3-5	0,43384	0,36852	1	-0,5454	1,4131
		Alter 11-15	-0,59584	0,29884	0,283	-1,3899	0,1982
		Alter 16-20	0,01997	0,31661	1	-0,8213	0,8613
	Alter 11-15	Alter 3-5	1,02968*	0,36781	0,033	0,0523	2,007
		Alter 6-10	0,59584	0,29884	0,283	-0,1982	1,3899
		Alter 16-20	0,61581	0,31578	0,313	-0,2233	1,4549
	Alter 16-20	Alter 3-5	0,41387	0,38239	1	-0,6022	1,43
		Alter 6-10	-0,01997	0,31661	1	-0,8613	0,8213
		Alter 11-15	-0,61581	0,31578	0,313	-1,4549	0,2233
HH Krümmung 180°	Alter 3-5	Alter 6-10	-0,26419	0,31533	1	-1,1021	0,5737
		Alter 11-15	-0,64816	0,31473	0,242	-1,4845	0,1882
		Alter 16-20	-0,03754	0,32701	1	-0,9065	0,8314
	Alter 6-10	Alter 3-5	0,26419	0,31533	1	-0,5737	1,1021
		Alter 11-15	-0,38397	0,25364	0,787	-1,058	0,29
		Alter 16-20	0,22665	0,26872	1	-0,4874	0,9407
	Alter 11-15	Alter 3-5	0,64816	0,31473	0,242	-0,1882	1,4845
		Alter 6-10	0,38397	0,25364	0,787	-0,29	1,058
		Alter 16-20	0,61062	0,26802	0,141	-0,1016	1,3228
	Alter 16-20	Alter 3-5	0,03754	0,32701	1	-0,8314	0,9065
		Alter 6-10	-0,22665	0,26872	1	-0,9407	0,4874
		Alter 11-15	-0,61062	0,26802	0,141	-1,3228	0,1016
HH Krümmung 270°	Alter 3-5	Alter 6-10	-0,45518	0,35175	1	-1,3899	0,4795
		Alter 11-15	-0,90993	0,35108	0,06	-1,8429	0,023
		Alter 16-20	-0,29965	0,36477	1	-1,269	0,6697
	Alter 6-10	Alter 3-5	0,45518	0,35175	1	-0,4795	1,3899
		Alter 11-15	-0,45475	0,28293	0,655	-1,2066	0,2971
		Alter 16-20	0,15553	0,29976	1	-0,641	0,9521
	Alter 11-15	Alter 3-5	0,90993	0,35108	0,06	-0,023	1,8429
		Alter 6-10	0,45475	0,28293	0,655	-0,2971	1,2066
		Alter 16-20	0,61028	0,29898	0,253	-0,1842	1,4048
	Alter 16-20	Alter 3-5	0,29965	0,36477	1	-0,6697	1,269
		Alter 6-10	-0,15553	0,29976	1	-0,9521	0,641
		Alter 11-15	-0,61028	0,29898	0,253	-1,4048	0,1842

\*Der mittlere Unterschied ist auf dem Niveau von 0,05 signifikant

**Tabelle 9:** Perzentile Vorderkammertiefe

Perzentile Vorderkammertiefe							
	Perzentile						
	5	10	25	50	75	90	95
ACD	2,6720	2,8100	2,9800	3,2000	3,3800	3,5460	3,6280

**Tabelle 10:** Perzentile Linsendicke

Perzentile Linsendicke							
	Perzentile						
	5	10	25	50	75	90	95
Linsendicke	3,1	3,18	3,32	3,46	3,6	3,72	3,84

## 8. Literaturverzeichnis

Abrahamsson M, Sjöstrand J. Astigmatic axis and amblyopia in childhood. *Acta Ophthalmologica Scandinavica* 2003; 81 (1): 33-37

Aghaian E, Choe JE, Lin S, Stamper RL. Central corneal thickness of Caucasians, Chinese, Hispanics, Filipinos, African Americans, and Japanese in a glaucoma clinic. *Ophthalmology* 2004; 111 (12): 2211-2219

Artal P. Image formation in the living human eye. *Annual review of vision science* 2015; 1: 1-17  
Bertram B, Gante C, Hilgers RD. Zunahme der Untersuchungen wegen Katarakt, Glaukom, diabetischer Retinopathie und Makuladegeneration. *Der Ophthalmologe* 2014; 8 (111): 757-764

Bours J, Födisch HJ. Human fetal lens: wet and dry weight with increasing gestational age. *Ophthalmic Research* 1986; 18(6): 363-368

Constantini E, Touzeau O, Gaujoux T, Basli E, Kopito R, Borderie VM, Laroche L. Age-related changes in central and peripheral corneal thickness. *Investigative Ophthalmology & Visual Science* 2009; 50 (13): 5107-5107

Coulombre JL, Coulombre AJ. Lens development. IV, Size, shape, and orientation. *Investigative Ophthalmology & Visual Science* 1969; 8 (3): 251-257

Dai E, Gunderson CA. Pediatric central corneal thickness variation among major ethnic populations. *Journal of American Association for Pediatric Ophthalmology and Strabismus* 2006; 10 (1): 22-25

Doughty MJ, Laiquzzman M, Müller A, Oblak E, Button NF. Central corneal thickness in European (white) individuals, especially children and the elderly, and assessment of its possible importance in clinical measures of intra-ocular pressure. *Ophthalmic and Physiological Optics* 2002; 22 (6): 491-504

Drews RC. Depth of field in slit lamp photography. An optical solution using the Scheimpflug principle. *Ophthalmologica* 1964; 148 (2): 143-150

Drexler W, Baumgartner A, Findl O, Hitzenberger CK, Fercher AF. Biometric investigation of changes in the anterior eye segment during accommodation. *Vision Research* 1997; 37 (19): 2789-2800

Duncan G, Wormstone IM, Davies PD. The aging human lens: structure, growth, and physiological behaviour. *British Journal of Ophthalmology* 1997; 81 (10): 818-823

Ehlers N, Sorensen T, Bramsen T, Poulsen EH. Central corneal thickness in newborns and children. *Acta ophthalmologica* 1976; 54: 285-290

Ehrt O. Amblyopie. *Monatsschrift Kinderheilkunde* 2010; 158: 646-652

Feuchtersleben EV. *Zur Diätetik der Seele*. Wien: C. Armbruster, 1838

Forrester JV, Dick AD, McMenemy P, Roberts F, Pearlman E. *The Eye: Basic Sciences in Practice* (fourth edition). London: Elsevier Science, 2015

Goldmann H, Niesel P. Studien über die Abspaltungstreifen und das Linsenwachstum. *Ophthalmologica* 1964; 147: 134-142

Gordon RA, Donzis PB. Refractive development of the human eye. *Archives of ophthalmology* 1985; 103 (6): 785-789

Grehn F. *Augenheilkunde* (31. Auflage). Heidelberg: Springer, 2012

Gunton KB, Nelson LB, Olitsky SE. Neonatal ophthalmology: ocular development in childhood. *Harley's Pediatric Ophthalmology*, 4<sup>o</sup> ed. 2005: 66-52

Hedderich J, Sachs L. *Angewandte Statistik: Methodensammlung mit R*. Berlin: Springer Spektrum, 17. Auflage 2020

Hockwin O, Dragomirescu V, Laser U, Wegener A, Eckerskorn U. Measuring lens transparency by Scheimpflug photography of the anterior eye segment: principle, instrumentation, and application to clinical and experimental ophthalmology. *Journal of Toxicology: Cutaneous and Ocular Toxicology* 1987; 6 (4): 251-271

Hockwin O. Scheimpflug photography of the lense. *Fortschritte der Ophthalmologie: Zeitschrift der Deutschen Ophthalmologischen Gesellschaft* 1989; 86 (4): 304-31

Hussein MAW, Paysse EA, Bell NP, Coats DK, McCreery KMB, Koch DD, Orengo-Nania S, Baskin D, Wilhelmus KR. Corneal thickness in children. *American Journal of Ophthalmology* 2004; 138(5): 744-748

Insler MS, Cooper DH, May SE, Donzis PB. Analysis of corneal thickness and corneal curvatures in infants. *Eye & Contact Lens* 1987; 13 (3): 182-184

Iribarren R. Crystalline lens and refractive development. *Progress in Retinal and Eye Research* 2015; 47: 86-106

Janssen J, Laatz W. *Statistische Datenanalyse mit SPSS: Eine anwendungsorientierte Einführung in das Basissystem und das Modul Exakte Tests*. Berlin: Springer Gabler, 9. Auflage 2016

Kashima K, Trus BL, Unser M, Edwards PA, Datiles MB. Aging studies on normal lens using the Scheimpflug slit-lamp camera. *Investigative Ophthalmology & Visual Science* 1993; 34 (1): 263-269

Khoramnia R, Rabsilber TM, Auffarth GU. Central and peripheral pachymetry measurements according to age using the Pentacam rotating Scheimpflug camera. *Journal of Cataract & Refractive Surgery* 2007; 33 (5): 830-836

Krauth C, Brümmer A, Bucholtz N, Amelung VE. *Bedarfsplanung in der Augenheilkunde*. *Gesundheits- und Sozialpolitik* 2012; 66 (3): 44-51

Lerche W, Wulle KG (1969): Electron microscopic studies on the development of the human lens 1969. *Ophthalmologica*; 158: 296-309

Levin LA, Nilsson Siv FE, Ver Hoeve J, Wu SM, Kaufman P, Alm A: Adler's Physiology of the Eye. Philadelphia: Saunders Elsevier, 2011

Lim LS, Chong GH, Tan PT, Chong YS, Kwek K, Gluckman PD, Fortier MV, Saw SM, Qiu A. Distribution and determinants of eye size and shape in newborn children: a magnetic resonance imaging analysis. *Investigative Ophthalmology & Visual Science* 2013; 54 (7): 4791-4797

Lu T, Song J, Wu Q, Jiang W, Tian Q, Zhang X, Zhang X, Xu J, Wu J, Hu Y, Sun W, Bi H. Refractive lens power and lens thickness in children (6 – 16 years old). *Scientific Reports* 2021; 11 (1): 19284

Matheus V, Arnaldo G, Camila Z, Bruna F, Rosane C, Andre O, Monica A, Vasconcellos JPC V. Corneal evaluation in healthy Brazilian children using a Scheimpflug topography system. *Journal of Clinical & Experimental Ophthalmology* 2017; 8 (2): 1-7

McAlinden C, Khadka J, Pesudovs K. A comprehensive evaluation of the precision (repeatability and reproducibility) of the Oculus Pentacam HR. *Investigative ophthalmology & visual science* 2011; 52 (10): 7731-7737

McAvoy JW, Chamberlain CG, de Longh RU, Richardson NA, Lovicu FJ. The role of fibroblast growth factor in eye lens development 1991. *Annals of the New York Academy of Sciences*; 638: 256-274

Merklinger HM. *Focusing the View Camera: A scientific Way to Focus the View Camera and Estimate Depth of Field*. Dartmouth: Harold M. Merklinger, 1993

Mutti DO, Mitchell GL, Jones LA, Friedman NE, Frane SL, Lin WK, Moeschberger ML, Zadnik K. Axial growth and changes in lenticular and corneal power during emmetropization in infants. *Investigative Ophthalmology & Visual Science* 2005; 46(9): 3074-3080

Niesel P: Spaltlampenphotographie der Linse für Mess zwecke. *Ophthalmologica* 1966; 152 (5): 387-395

Nussbaum M. Entwicklungsgeschichte des menschlichen Auges. Berlin Heidelberg: Springer, 1912  
Oculus Optikgeräte GmbH. Oculus Pentacam® HR Interpretationsleitfaden 3. Auflage (2020):  
[https://www.pentacam.com/fileadmin/user\\_upload/pentacam.de/downloads/interpretations-leitfaden/Pentacam\\_Interpretationsleitfaden\\_3rd\\_0218\\_k.pdf](https://www.pentacam.com/fileadmin/user_upload/pentacam.de/downloads/interpretations-leitfaden/Pentacam_Interpretationsleitfaden_3rd_0218_k.pdf)  
(Zugriffsdatum: 23.07.2022)

Oculus Optikgeräte GmbH Online-Shop (2021): <https://www.oculus-onlineshop.de/tomographie/oculus-pentacam-hr.html> (Zugriffsdatum: 22.07.2022)

Oculus Pentacam® HR internationale Produktseite (2021):  
<https://www.pentacam.com/int/technology/measurement-principle-licences-network-1.html> (Zugriffsdatum: 23.07.2022)

Orucoglu F, Akman M, Onal S. Analysis of age, refractive error and gender related changes of the cornea and the anterior segment of the eye with Scheimpflug imaging. Contact Lens and Anterior Eye 2015; 38 (5): 345-350

Pediatric Eye Disease Investigator Group. Central corneal thickness in children. Archives of Ophthalmology 2011; 129 (9): 1132-1138

Prasad A, Fry K, Hersh PS. Relationship of age and refraction to central corneal thickness. Cornea 2011; 30 (5): 553-555

Read SA, Collins MJ, Carney LG. A review of astigmatism and its possible genesis. Clinical and Experimental Optometry 2007; 90 (1): 5-19

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

Rüfer F, Schröder A, Bader C, Erb C. Age-related changes in central and peripheral corneal thickness: determination of normal values with the Orbscan II topography system. Cornea 2007; 26 (1): 1-5

Scheimpflug T. Die Herstellung von Karten und Plänen auf photographischem Wege. Wien: A. Hölder, 1907

Tamm ER, Ohlmann A. Entwicklung des menschlichen Auges. *Der Ophthalmologe* 2012; 9 (109): 911-928

Technische Universität Wien Alumni Club (2015). Theodor Scheimpflug: <https://www.tualumni.at/2015/04/theodor-scheimpflug/> (Zugriffsdatum: 22.07.2022)

Wegener A. Scheimpflug-Verfahren. *Der Ophthalmologe* 2014; 111 (10): 912-913

Wirbelauer C, Gochmann R, Pham DT. Untersuchungen der vorderen Augenkammer mittels optischer Kohärenz-Tomographie (OCT). *Klinische Monatsblätter für Augenheilkunde* 2005; 222 (11): 856-862

Wolfram C, Pfeiffer N. Weißbuch zur Situation der ophthalmologischen Versorgung in Deutschland. München: Deutsche Ophthalmologische Gesellschaft, 2012

Wolfram C, Schuster AK, Elflein HM, Nickels S, Schulz A, Wild PS, Beutel ME, Blettner M, Münzel T, Lackner KJ, Pfeiffer N. Prävalenz von Sehbehinderung in der erwachsenen Bevölkerung. *Deutsches Ärzteblatt* 2019; 116: 289-295

World Medical Association. World Medical Association Declaration of Helsinki. Ethical principles for medical research involving human subjects. *Bulletin of the World Health Organization* 2013; 79 (4): 373-374

Yoshioka N, Zangerl B, Nivision-Smith L, Khuu SK, Jones BW, Pfeiffer RL, Marc RE, Kalloniatis M. Pattern recognition analysis of age-related retinal ganglion cell signatures in the human eye. *Investigative Ophthalmology & Visual Science* 2017; 58 (7): 3086-3099

Zhao KK, Yang Y, Wang H, Li L, Wang ZY, Jiang F, Qu JF. Axial length/corneal radius of curvature ratio and refractive development evaluation in 3- to 4-year-old children: the Shanghai Pudong eye study. *International Journal of Ophthalmology* 2019; 12(6): 1021-1026

Zheng YF, Huang G, Huang W, He M. Distribution of Central and Peripheral Corneal Thickness in Chinese Children and Adults: the Guangzhou Twin Eye Study. *Cornea* 2008; 27 (7): 776-781

## **9. Danksagung**

Ein großer Dank gilt PD Dr. A. Wegener für die Überlassung des Themas und seine stete und geduldige Betreuung. Er stand mir sowohl mit fachlicher Unterstützung zur Seite als auch mit menschlichem Rat.

An dieser Stelle möchte ich mich bei der orthoptischen Abteilung der Augenklinik Bonn für das Akquirieren der Teilnehmer bedanken. Ich habe eine tolle Zeit in dieser Abteilung verbracht und sehr viel gelernt.

Ein besonderer Dank gilt Martin Lörtscher für seine tatkräftige Hilfe in Bezug auf statistische Fragen sowie für Gespräche zur Lage der Nation.

Mein unsagbarer und innigster Dank gilt Jan Durwish, ohne den ich nicht dort wäre, wo ich jetzt bin. Keine Danksagung und keine Worte können beschreiben, welche tiefe Verbundenheit und unendliche Liebe ich für ihn empfinde.

Ein ganz herzlicher Dank gilt meinen Eltern, die mich mit viel Unterstützung und Liebe begleitet haben.