



**Bachelorarbeit des Studiengangs
Augenoptik und Hörakustik**

Peter Baumbach

Prof. Dr. rer. nat. Peter Baumbach

Biometrie des Auges

Prüfer: Prof. Dr. rer. nat. Peter **Baumbach**

Zweitprüfer: Ralf Michels

Biometrie des Auges

Zugelassene Abschlussarbeit des Studiengangs Augenoptik und Hörakustik
zur Erlangung des akademischen Grades Bachelor of Science

vorgelegt von
Tatjana Rudi

Tag der Einreichung:

TT.MM.JJJ

Fakultät Augenoptik und Hörakustik
Hochschule Aalen

Erklärung

Ich versichere hiermit, dass ich die vorliegende Bachelorthesis / Masterthesis selbstständig und ohne fremde Hilfe angefertigt und keine andere als die angegebene Literatur benutzt habe. Alle von anderen Autoren wörtlich übernommenen Stellen wie auch die sich an die Gedankengänge anderer Autoren eng anlehnenden Ausführungen meiner Arbeit sind besonders gekennzeichnet. Diese Arbeit wurde bisher in gleicher oder ähnlicher Form keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch nicht veröffentlicht.

Ort, Datum

Unterschrift

Inhaltsverzeichnis

Erklärung	II
Inhaltsverzeichnis	III
Formelzeichen	IV
Abkürzungen	V
Abstract	1
1 Einleitung	2
1.1 Motivation	3
2 Ziele der Arbeit	5
2.1 Stand der Forschung und Technik	5
3 Material und Methoden	7
3.1 Versuchspersonen	7
3.2 Dokumentation	7
3.3 Messungen	8
3.4 Statistische Auswertung	11
4 Ergebnisse	13
4.1 Sphärisches Äquivalent und Augenlänge	15
4.2 Sphärisches Äquivalent und die Vorderkammertiefe	18
4.3 Augenlänge und Vorderkammertiefe	20
5 Diskussion	22
5.1 Methode	22
5.2 Ergebnisse	23
6 Schlussfolgerung	25
7 Ausblick	26
Literaturverzeichnis	VIII
Abbildungsverzeichnis	X
Tabellenverzeichnis	XI
Anhang	XII

Formelzeichen

Zeichen	Einheit	Bedeutung
α	-	Signifikanzniveau
df	-	Freiheitsgrade
λ	nm	Wellenlänge
n_1	-	Fallzahl
QS_x	mm	Quadratsumme der x-Werte
r_{xy}	-	Korrelation in Excel
s_e	-	Standardschätzfehler
s_y	dpt	Standardabweichung
s_{y0}	dpt	Standardabweichung der Regressionsgeraden
\bar{x}	mm	Mittelwert
x_0	mm	x-Wert der Regressionsgeraden
\hat{y}_0	dpt	y-Wert der Regressionsgeraden

Abkürzungen

Zeichen	Bedeutung
°	Grad
A	Achse
cyl	Zylinder
dpt	Dioptrie
HOA/HO	High Order Aberration
HSA	Hornhautscheitelabstand
K	Hornhautkrümmung
LOA/LO	Low Order Aberration
m	Schwingungsperiode
n	Radiale Ordnung
PD ¹	Pupillendurchmesser
R1	Hornhautradius (flach)
R2	Hornhautradius (steil)
RMS	root-mean-square (Standardabweichung des Wellenfrontfehlers)
SÄ	Sphärisches Äquivalent
sph	Sphäre
Vgl.	Vergleiche
Z	Zernike

¹ In der Excel-Tabelle zu finden

Abstract

Einleitung: Das menschliche Auge ist in vielerlei Hinsicht ein individuelles Sinnesorgan, das über 80 Prozent der Eindrücke aufnimmt und verarbeitet. Umso wichtiger ist es, unabhängig von dem medizinischen Hintergrund einer Person, die bestmögliche Sehschärfe des Auges zu erzielen, um die Lebensqualität zu verbessern. Da das Auge und dessen Medien nicht anatomisch perfekt und bei jedem Menschen gleich sind, kann ein myopes und hyperopes Auge korrigiert und die Sehleistung durch Sehhilfen verbessert und optimiert werden. Wovon jedoch die jeweilige Sehleistung abhängt und welche Bereiche des Auges besonders zusammenhängen, wird in dieser Studie thematisiert.

Ziele und Methode: Das Ziel der Studie besteht darin, 200 Probanden an den Zeiss-Geräten i.Profiler und IOL Maser 500 zu vermessen, um ein individuelles Augenmodell überprüfen zu können. Zusätzlich wird untersucht wie das Sphärische Äquivalent (SÄ) der Probanden, mit der jeweiligen Augenlänge und der Vorderkammertiefe korreliert. Die Messungen der zufällig ausgewählten Probanden erfolgten immer am rechten Auge zwischen 9:00 und 15:00 Uhr.

Ergebnisse: Alle einzelnen Ergebnisse der Messung wurden für die weitere Verarbeitung in Form einer Exceltabelle auf einer CD gesichert. Nach dem Ausschlussverfahren wurden insgesamt 179 Personen für die Studie akzeptiert. Das mittlere Probandenalter ergab $24,03 \pm 5,13$ Jahren, die mittlere Körpergröße $176 \pm 9,0$ cm und das mittlere SÄ von $-1,58 \pm 2,0$ dpt. Die Augenlänge beträgt im Mittel $24,07 \pm 1,11$ mm und hat einen Median von 23,93 mm. Das Testergebnis der Korrelation des SÄ und Augenlänge ergibt einen höchst signifikanten p-value von $2.2e-16$ und einen rho-Wert von -0.59, der eine mittlere negative Korrelation ergibt. Die mittlere Vorderkammertiefe beträgt $3,59 \pm 0,29$ mm und hat einen Median von 3,61 mm. Der höchst signifikante p-value der Korrelation des SÄ und der Vorderkammertiefe beträgt $9.753e-06$ und der rho-Wert ergibt -0.32, was eine geringe negative Korrelation ergibt.

Schlussfolgerung: Die Ergebnisse zeigen einen deutlichen Zusammenhang der Anatomie und der Sehstärke des Auges. Mit der Reproduzierbarkeit der Studie können die Werte für weitere Forschungszwecke verwendet und ergänzt werden.

Keywords: Sphärisches Äquivalent, Augenlänge, Vorderkammertiefe, i.Profiler, IOL Master 500, Korrelation, Abbildungsfehler, Augenmodell.

1 Einleitung

Jeder Mensch ist für sich individuell und einzigartig, unabhängig von Körpergröße, Haut- und Haarfarbe oder Gesichtsmerkmalen. So wie jeder einzelne Fingerabdruck ist auch jedes einzelne Auge an sich einzigartig und individuell. Des Öfteren werden heutzutage neuste Algorithmen verwendet, um mit Hilfe der Augenscans Personen zu authentifizieren und identifizieren. Dazu wird die Iris des Auges mit einer Infrarotlichtkamera aufgenommen und es werden individuelle Merkmale, wie Rillen und Einkerbungen, von dem System eingepreßt und gespeichert. In vielen Bereichen, beispielsweise in der Smartphone-Industrie oder bei Militär, zählt die Biometrie des Auges, neben dem Fingerabdruck, zu einen der sichersten Identifizierungsmethoden.

Trotz des ähnlichen Aufbaus des Auges unterscheiden sich nicht nur die Iris und ihr individuelles Muster bei jedem Menschen, sondern auch die Achslänge des Auges, die Hornhautdicke und -beschaffenheit, der Hornhautdurchmesser, die Vorderkammertiefe, die Linse, die Retina und die Blutgefäße.

Um dennoch die Komplexität des Auges verstehen und visualisieren zu können, wurden schon zahlreiche Augenmodelle erstellt. Zudem gehören auch die Augenmodelle von Gullstrand, der nach vielen Messungen das Durchschnittsauge standardisiert und vereinfacht hat (Vgl. Goersch, 2000, S. 86 f.). An diesen Modellen orientieren sich viele Wissenschaftler, um die Abbildungseigenschaften des optischen Apparates zu verbessern (Vgl. Lang, 2015, S. 35 f.) Mit Hilfe neuer Geräte und Techniken lassen sich beinahe alle geometrischen Daten des Auges auf Nanometer genau aufnehmen und analysieren. Doch nicht alle Abbildungsfehler können beispielsweise durch Brillengläser oder Kontaktlinsen korrigiert werden.

1.1 Motivation

Die verschiedenen brechenden Medien des Auges sorgen bei jedem Einzelnen für die individuelle Sehschärfe und unterschiedliche Abbildungsfehler, welche für die Erstellung eines individuellen Augenmodells erforderlich sind.

Ein standardisiertes emmetropes menschliches Auge hat eine Achslänge von 24 mm. Schon minimale Abweichungen machen das Auge myop oder hyperop. Ein Millimeter Längenabweichung entspricht in der Regel drei Dioptrien Fehlsichtigkeit, woraus die Fragestellung entspringt, in wie weit diese Faustregel der Realität entspricht. Wenn ja, gibt es Unterschiede zwischen den Myopen, Hyperopen und Emmetropen?

Die Vorderkammertiefe ist ebenfalls ein Teil des menschlichen Auges und somit ein Teil des abbildenden Systems, weshalb die Fragestellung aufkommt, ob die Vorderkammertiefe einen erheblichen Einfluss auf die Sehschärfe ausübt, welcher in der Bachelorthesis nachgekommen wird.

Der Pupillendurchmesser hat ebenso große Auswirkung auf die Abbildungseigenschaft des optischen Systems. Betrachtet man eine kleine Pupille, unter 3 mm Durchmesser, so werden die Lichtstrahlen besser von der Augenlinse gebündelt und punktuell auf der Netzhaut abgebildet. Ist die Pupille erweitert, so werden die Lichtstrahlen an den Medien des Auges, wie der Hornhaut und deren Unregelmäßigkeiten, der Vorderkammer und der Linse unregelmäßig gebrochen, sodass nicht nur ein abbildender Punkt, sondern eine großflächige Lichtverteilung auf der Netzhaut entsteht und diese somit als Halo, Blendung oder Kontrastminderung subjektiv wahrgenommen wird (Vgl. Karimian, F; et al., 2010, S. 3).

Diese Abbildungsfehler werden in zwei Formen eingeteilt. Zum einem die sphärischen Aberrationen, bei den die Zernike Werte symmetrisch sind, und zum anderen die Koma, deren Zernike Werte asymmetrisch sind.

Diese werden auch allgemein als $Z(n, \pm m)$ bezeichnet. Mit dem Index n wird die radiale Ordnung der Potenzreihe ausgedrückt und m kennzeichnet die Schwingungsperiode der periodischen Wellenfrontfehler. Die rotationssymmetrischen Abbildungsfehler zeichnen sich durch geradzahlgigen n und $m=0$ aus, wodurch andere ungeraden n somit winkelabhängig und asymmetrisch sind. Bis zur zweiten Ordnung $Z(2, \pm 2)$ können die sphärischen und zylindrischen Abbildungsfehler durch Kontaktlinsen oder Brillengläser ausgeglichen werden. Diese werden auch

als Fehler niedriger Ordnung (LOA) bezeichnet. Ab der dritten Ordnung ($Z(3, \pm 1)$ und $Z(3, \pm 3)$) werden die Abbildungsfehler als Fehler höherer Ordnung (HOA) bezeichnet und können durch ein Brillenglas oder einer Kontaktlinse nicht auskorrigiert werden.

Es wird zwischen der okularen, der gesamten Wellenfront und der kornealen Wellenfront unterschieden. Bei der kornealen Wellenfront wird die Hornhaut gemessen und pupillengrößenunabhängig analysiert. Bei der okularen Wellenfrontmessung wird das Gesamtauge analysiert, zu dem auch der maximale Pupillendurchmesser, die Vorderkammer und die Augenlinse gehören. Bei einer Anomalie wird der Zernike-Wert von $1,0 \mu\text{m}$ überschritten (Vgl. Müller-Treiber, 2013, S. 67 ff.).

Für die Erstellung des Augenmodells werden ebenso die Hornhautradien und der Hornhautdurchmesser benötigt, die im Folgenden ebenso vermessen werden.

2 Ziele der Arbeit

Das primäre Ziel der Bachelorthesis besteht darin, 200 gesunde Probandenaugen an dem i.Profiler und dem Biometer IOL Master 500 auszumessen. Mit dem i.Profiler werden die Hornhautradien, die sphäro-zylindrischen Werte und die Abbildungsfehler des Auges ermittelt, die von der Größe der jeweiligen Pupille bestimmt werden. Mit dem Biometer IOL-Master 500 werden Augenlänge, Vorderkammertiefe, Hornhautradien und Hornhautdurchmesser ermittelt. Die Messungen werden immer am rechten Auge durchgeführt und die resultierenden Daten in einer Exceldatei als Spaltenvektoren auf einer CD gespeichert. Diese Daten werden benutzt, um ein individuelles Augenmodell überprüfen zu können (Masterarbeit Kai Neller: Development of an individual Eye Model 2019).

Dazu wird zusätzlich erforscht, welchen Einfluss die Augenlänge auf die Fehlsichtigkeit des Auges ausübt und in wie weit die Vorderkammertiefe mit dem Sphärischen Äquivalent zusammenhängt. Ergänzend wird die Korrelation der beiden Einflussfaktoren, Augenlänge und Vorderkammertiefe überprüft.

2.1 Stand der Forschung und Technik

Mehrere Studien haben sich mit der Fragestellung beschäftigt, ob es einen Zusammenhang zwischen der Augenlänge und der Sehschärfe besteht. Es stellt sich heraus, dass auf das zunehmende Wachstum des Auges eine Myopisierung folgt (Vgl. Mutti, D.; Mitchell, G. et al., 2005, S. 3077 f.). Dabei wurden jedoch ausschließlich Neugeborene bis zum neunten Lebensmonat untersucht. Da sich das Auge bis zum sechsten Lebensjahr vollständig entwickelt, kann es mit einem erwachsenen Auge nicht verglichen werden.

Eine Studie jedoch hat sich bereits mit der Fragestellung beschäftigt und Rückschlüsse gezogen (Vgl. Bayha, C.; Bretz, M.; Grau, D.; Michel, H., 2018). Desgleichen stellt diese Studie einen signifikanten Zusammenhang zwischen der Achslänge des Auges und der Sehstärke fest. Dabei handelte es sich um eine Altersgruppe, die das 18te Lebensjahr erreicht hat und somit einen Vergleich zu der vorliegenden Thesis ermöglicht.

Ob es eine Korrelation zwischen der Vorderkammertiefe und dem Sphärischen Äquivalent besteht, erweist sich als unklar, da derzeit keine aktuellen Studien bezüglich der Korrelation der eben genannten Variablen zu finden sind. Einige Studien jedoch haben sich damit beschäftigt, einen Zusammenhang zwischen der Achslänge des Auges und der Vorderkammertiefe zu ermitteln, welcher sich als signifikant herausstellte. Dadurch kann ein Zusammenhang zu der Sehschärfe hergestellt werden (Vgl. Stavridis, E., 2012, S. 40), (Vgl. Hoffmann, P. C., 2008, S. 219).

Auch bei den Abbildungsfehlern können Parallelen zur Sehstärke hergestellt werden. Die Studien haben sich hauptsächlich mit myopen bis stark-myopen Augen beschäftigt und stellten fest, dass eine Zunahme der Myopie die optische Abbildung verschlechtert (Vgl. Paquin, M; et al., 2002, S. 285 ff.). Ebenso die Koma ist bei Myopen stärker ausgeprägt als bei Emmetropen und Hyperopen (Vgl. Plainis, S.; Pallikaris, I.G., 2007, S. 759). In allen Studien, die sich mit Zernike-Werten befasst haben, wurde bei allen Probanden der gleiche Hornhautdurchmesser zum Vergleich bestimmt. Da die Pupillendurchmesser in der vorliegenden Bachelorthesis unterschiedlich ausfallen, werden daher keine Zusammenhänge und Auswertungen erstellt.

3 Material und Methoden

Im Rahmen der Bachelorarbeit fanden alle Messungen in der Hochschule Aalen im Gebäude G4 auf dem Campusteil Burren im Raum +0.14 zwischen 08:00 Uhr und 15:00 Uhr statt. Die Probanden wurden persönlich angesprochen, da dies zu den meisten Zusagen geführt hat. Diese wurden dementsprechend im Voraus über das Verfahren der Messungen und die Ziele der Thesis aufgeklärt und hatten die Gelegenheit, bei Unklarheiten Fragen zu stellen. Zusätzlich wurde ein Plakat erstellt, das zusätzlich potenzielle Probanden für die Studie gewinnen sollte.

Auf jeglichen Einfluss pharmazeutischer Mittel (z.B. Augentropfen) und mechanischen Kontakt wurde dabei verzichtet. Alle Messungen waren nicht-invasiv und nahmen ca. 15 Minuten pro Person in Anspruch.

3.1 Versuchspersonen

Es wurden zunächst Kriterien für die Auswahl der 200 Versuchspersonen bestimmt: die Probanden haben das 18-te Lebensjahr erreicht, haben ein gesundes rechtes Auge und haben innerhalb der letzten 24 Stunden auf Fremdkörper im Auge (z.B. weiche, formstabile oder orthokeratologische Kontaktlinsen) verzichtet, da diese die Hornhautoberfläche verändern und somit die Hornhautradien, Abbildungsfehler und allgemeine Sehfehler verfälschen. Bei den Probanden handelt es sich um Studierende und Mitarbeiter der Hochschule Aalen.

3.2 Dokumentation

Vor den Messungen wurde jeder Proband über die Messungen und die Studie ausführlich aufgeklärt und aufgefordert, einen Fragebogen (siehe Anhang) auszufüllen und eine Datenschutzerklärung (siehe Anhang) zu unterschreiben. Der Fragebogen beinhaltet folgende persönliche Daten: Name, Vornamen, Alter, Körpergröße und Geschlecht. Zudem mussten die Probanden ihre Augenvorgeschichte schildern, da diese zu einem Ausschlusskriterium aus der Studie hätten führen können. Dabei handelt es sich um relevante Erkrankungen

oder Manipulationen, welche das Auge und das Sehen erheblich verändern oder beeinträchtigen. Dazu gehören: Glaukom, Katarakt, Augeninfektion, Laseroperation, Augenverletzung/-operation, Trauma und Allgemeinerkrankung (Diabetes, Bluthochdruck, etc.). Die Probanden-Nummer wurde vom Untersucher vergeben und anonymisiert.

Die Datenschutzerklärung informiert den Probanden über die Ziele der Studie, den Ablauf der Messungen, garantiert die Verschwiegenheit von aufgelisteten persönlichen Daten sowie keine Weitergabe an Dritte. Außerdem klärt die Datenschutzerklärung den Probanden über die Freiwilligkeit der Teilnahme, Risiken und Rücktrittsrecht ohne nachteilige Folgen auf. Durch die freiwillige Angabe der Telefonnummer und/oder E-Mail-Adresse bestätigten die Probanden die Kontaktaufnahme bei zukünftigen Projekten oder Studien, bei denen Messungen benötigt werden.

3.3 Messungen

Von jedem Probanden wurden zwei Messungen, jeweils eine am i.Profiler^{® plus} und an dem Biometer IOL Master[®] 500 von der Firma Carl Zeiss AG, am rechten Auge durchgeführt.

Der i.Profiler wurde auf den vollautomatischen Modus eingestellt. Das Gerät misst mit einer Wellenlänge von $\lambda = 555 \text{ nm}$, einem HSA von 12 mm und kombiniert einen hochauflösenden Hartmann-Shack-Wellenfrontsensor und den ATLAS Hornhauttopografen. Dabei werden Messungen an 1.500 Punkten bei einer Pupillenöffnung von 7 mm durchgeführt und ermittelt.

Der Proband wurde aufgefordert, die Stirn und das Kinn auf die vorgesehene Stütze zu legen und auf dem vorgeführten Fixierbild die Streifen des Heißluftballons zu fixieren. Siehe die nachfolgende Abbildung 1.



Abbildung 1 Messung mit dem i.Profiler

Bevor die Messung startete, wurde der Proband darauf hingewiesen, zu blinzeln und anschließend die Augen weit offen zu lassen, um den Tränenfilm zu optimieren und das bestmögliche Messergebnis zu erhalten. Für die Studie wurden folgende Werte (Tabelle 1) in eine Excel-Tabelle (siehe Anhang) übertragen:

Tabelle 1 Werte des i.Profilers

Okulare Wellenfront:	Pupillendurchmesser (mm)	Sphäre (dpt)	Zylinder (dpt)
	Achse (°)	Gesamt-RMS (μm)	LO RMS (μm)
	HO RMS (μm)	Werte der Zernike (2,-2) – (7,7) (μm)	
Korneale Wellenfront:	Pupillendurchmesser (mm) ²	Werte der Zernike (2,-2) – (7,7) (μm)	
Axiale Krümmung:	K, flach (mm)	K, steil (mm)	

² Hier wurde der Durchmesser der Pupille von dem Untersucher so gewählt, dass er bei dem 2D Modell möglichst wenige Fehldaten aufwies. (Abbildung 2)

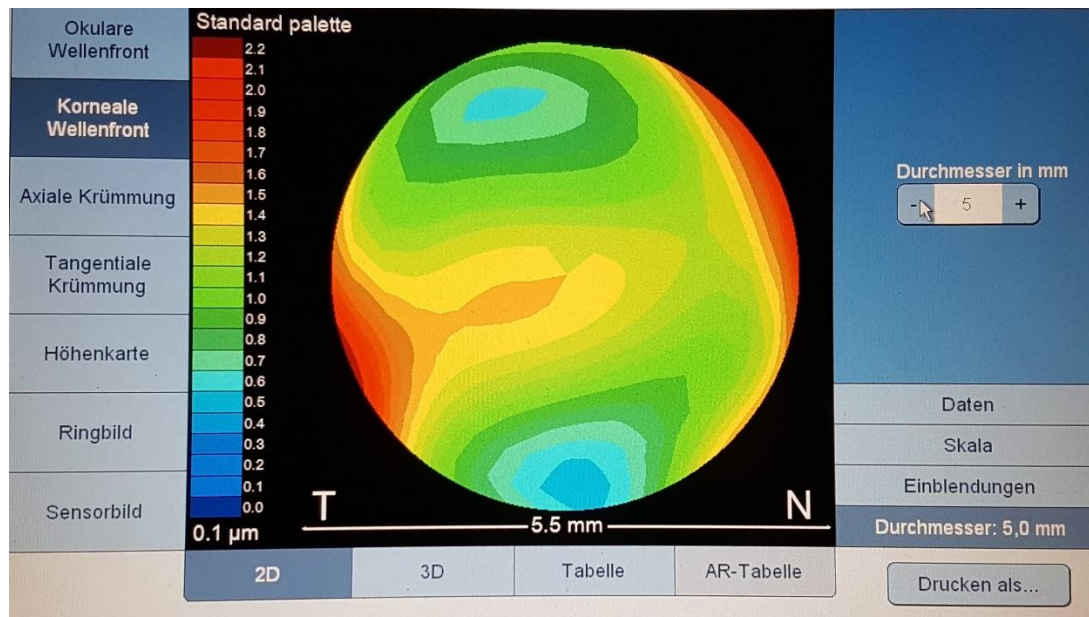


Abbildung 2 2D Modell der Kornealen Wellenfront

Für die Ermittlung des Sphärischen Äquivalents (SÄ) wird folgende Formel verwendet:

$$S\ddot{A} \text{ (dpt)} = sph + \frac{1}{2} cyl \quad (1)$$

Als nächstes wurde die Messung mit dem Biometer IOL Master 500 durchgeführt. Der IOL Master 500 wurde von dem Untersucher manuell bedient. Das Gerät wurde jeden Tag vor den Messungen nach Vorschrift kalibriert, um Fehlanalysen vorzubeugen. Vor dem Auslösen wurde der Proband darauf hingewiesen, einmal kräftig zu blinzeln, das Fixierlicht anzuvisieren und die Augen weit offen zu lassen. Dabei entstanden folgende Werte, die als Mittelwert vom Gerät ermittelt und in die Excel-Tabelle eingetragen wurden: Achslängenwerte (mm), Keratometerwerte R1/R2 (mm), Vorderkammertiefe (mm) und horizontaler Hornhautdurchmesser (WZW) (mm).



Abbildung 3 Messung mit dem IOL Master 500

3.4 Statistische Auswertung

Die statistische Auswertung erfolgte über MS-Excel und Statistikprogramm „R“ (Version 3.5.3, The R Foundation).

Für die Ermittlung der Regressionsgeraden des Sphärischen Äquivalents (y_1 -Wert) in Bezug zur Augenlänge/Vorderkammertiefe (x -Wert) werden die Messdaten jeweils in einem geeigneten Diagramm in Excel gegenübergestellt.

Ausgehend von der Regressionsgeraden wird ein dazugehöriges Konfidenzintervall von 99,5 % mittels Formeln (3) - (5) ermittelt (Vgl. Bortz, J.; Schuster, C., 2010, S.183 ff.). Der folgende Befehl dient der genauen Berechnung des t -Wertes in Excel. Um den t -Wert des 99,5 % Konfidenzintervalls zu erhalten, wird für die Wahrscheinlichkeit der Wert von 0,0025 gewählt und bei 179 Probanden ergeben sich hiernach 179 Freiheitsgrade df . Daraus ergibt sich ein errechneter t -Wert von 2,8422.

$$t - \text{Wert} = -T.INT(\text{Wahrscheinlichkeit}; df) \quad (2)$$

$$\text{obere/untere Grenze} = \hat{y}_0 \pm t_{df; 1-\frac{\alpha}{2}} * s_{\hat{y}_0} \quad (3)$$

Für \hat{y}_0 wird jeder berechnete y-Wert der Regressionsgeraden eingesetzt. Um die Standardabweichung $s_{\hat{y}_0}$ der Regressionsgeraden berechnen zu können, wird folgende Formel verwendet, die die Probandenanzahl n_1 , den Mittelwert der dazugehörigen x-Werte \bar{x} , dessen Wert auf der Regressionsgeraden x_0 und den Standardschätzfehler s_e beinhaltet, wobei $QS_x = \sum_{x_0} (x_0 - \bar{x})^2$ als Quadratsumme aller x-Werte definiert wird.

$$s_{\hat{y}_0} = s_e * \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{(x_0 - \bar{x})^2}{QS_x}} \quad (4)$$

Zuletzt wird der Standardschätzfehler s_e benötigt, welcher aus der folgenden Formel zu entnehmen ist:

$$s_e = \sqrt{s_y^2 * (1 - r_{xy}^2) * \frac{n_1 - 1}{n_1 - 2}} \quad (5)$$

Für die Interpretation der Ergebnisse werden alle Daten in dem Statistikprogramm R gegenübergestellt und ausgewertet. Nach dem Test auf die Normalverteilung, stellt sich die Rangkorrelation nach Spearman als geeigneter Test auf Zusammenhänge heraus. Der Befehl für den Test auf Normalverteilung der x-Werte:

`shapiro.test(x1)`

Der Befehl für den Test der Rangkorrelation nach Spearman:

`cor.test(y1,x1,method="spearman")`

4 Ergebnisse

Für das Programm des individuellen Augenmodels wurden alle Werte in Form einer Exceldatei auf einer CD gespeichert.

Von insgesamt 200 Versuchspersonen wurden 179 Personen für die Bearbeitung und Auswertung berücksichtigt. 21 Probanden wurden ausgenommen, da sie die Ausschlusskriterien erfüllten und deshalb in die Wertung nicht einbezogen werden konnten. Die Auswertung des R Statistikprogramms ergab 110 männliche und 69 weibliche Probanden. Das mittlere Probandenalter ergab $24,03 \pm 5,13$ Jahren und die mittlere Körpergröße $176 \pm 9,0$ cm. Die folgende Tabelle zeigt außerdem einen Ausschnitt aus R und gibt eine detaillierte Auskunft über die Verteilung des Alters (Jahre) und der Körpergröße (cm). Übersichtshalber wurden zusätzlich Boxplots von den jeweiligen Variablen erstellt.

Tabelle 2 Statistische Größen der Probanden

Alter		Körpergröße	
Min.	:18.00	Min.	:155
1st Qu.	:21.00	1st Qu.	:169
Median	:23.00	Median	:178
Mean	:24.03	Mean	:176
3rd Qu.	:25.00	3rd Qu.	:183
Max.	:55.00	Max.	:198

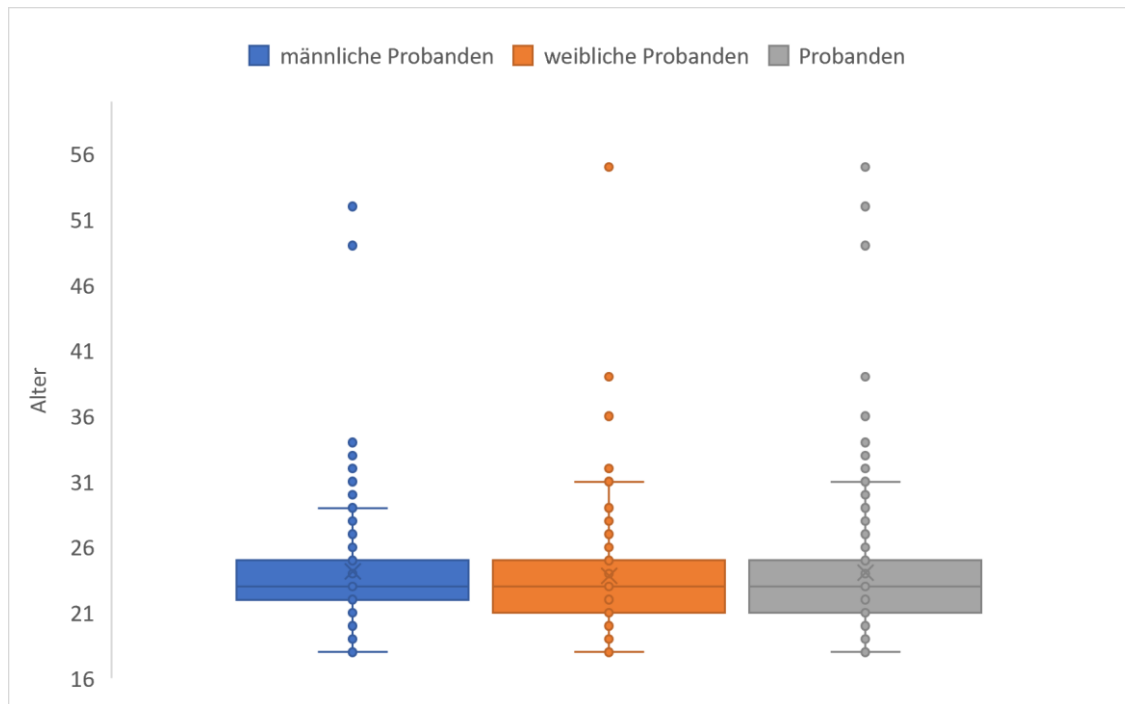


Abbildung 4 Alter der Probanden

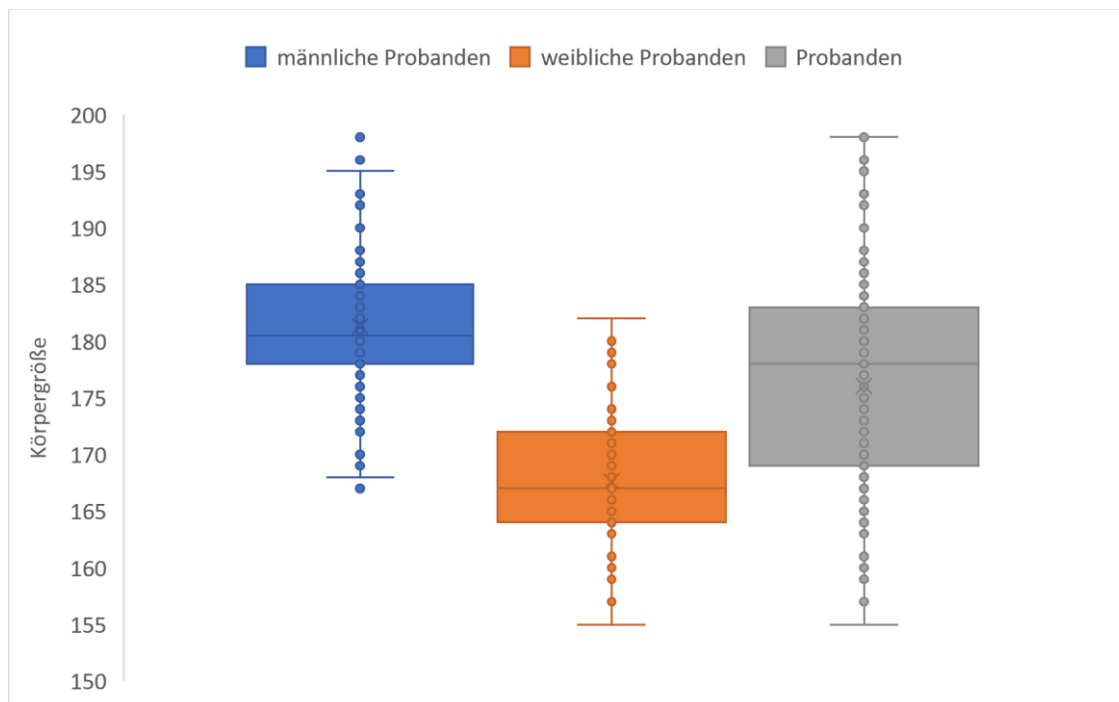


Abbildung 5 Körpergröße der Probanden

Ausgehend vom Sphärischen Äquivalent wurden drei Gruppierungen definiert. Alle SÄ-Werte zwischen -0,50 dpt und +0,50 dpt wurden unter Emmetropie, Werte über +0,5 dpt wurden unter Hyperopie und Werte unter -0,5 dpt unter Myopie eingeordnet. Somit erweisen sich 9 Probanden als hyperop, 45 Probanden als emmetrop und 125 Probanden als myop. Dies ergibt einen Mittelwert des SÄ von $-1,58 \pm 2,0$ dpt.

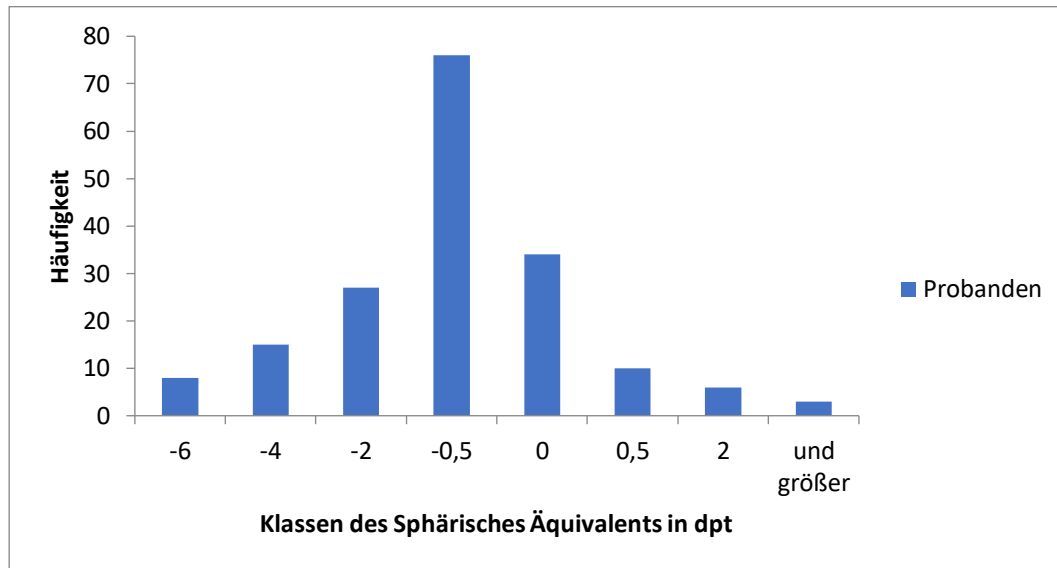


Abbildung 6 Verteilung des Sphärischen Äquivalents

4.1 Sphärisches Äquivalent und Augenlänge

Die Augenlänge beträgt im Mittel $24,07 \pm 1,11$ mm und hat einen Median von 23,93 mm. Das Diagramm visualisiert den Zusammenhang zwischen der Achslänge des Auges und dem Sphärischen Äquivalent. Mittels Excel wurde eine Regressionsgerade y gezogen und R^2 errechnet.

$$y = -1,2237x + 27,868$$

$$R^2 = 0,4568$$

Das folgende Diagramm zeigt die erhobenen Daten der 179 Probanden mit der Regressionsgeraden und dem dazugehörigen 99,5 %-Konfidenzintervall, das jeweils die untere und die obere Grenze anzeigt.

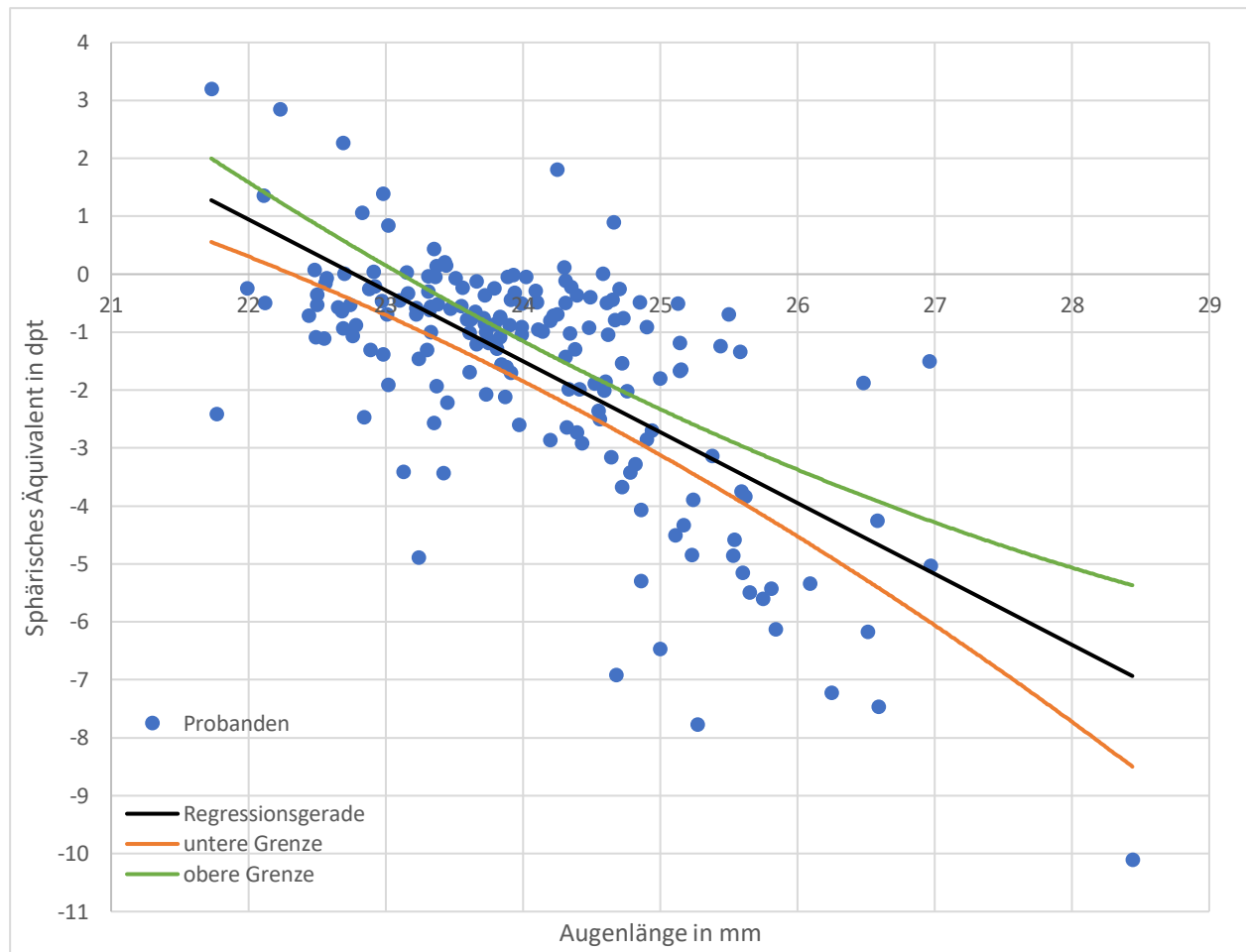


Abbildung 7 Verteilung der Augenlänge und des SÄ

Die Auswertung des „R“ Statistikprogramms erfolgte über den Spearman-Korrelation Test. Der Ausschnitt in der unteren Abbildung 8 zeigt die resultierenden Werte.

```
Spearman's rank correlation rho

data:  yl and xl
S = 1511800, p-value < 2.2e-16
alternative hypothesis: true rho is not equal to 0
sample estimates:
      rho
-0.5815888

Warnmeldung:
In cor.test.default(yl, xl, method = "spearman") :
  Kann exakten p-Wert bei Bindungen nicht berechnen
```

Abbildung 8 Rangkorrelation nach Spearman AL und SÄ

Das Testergebnis ergibt einen p-value von $2.2e-16$ und einen rho-Wert von -0.59 . Die Bedeutung der Ergebnisse wird im Abschnitt 4 (Diskussion) näher erläutert.

Infolgedessen wurden die Probanden zusätzlich in zwei Teilgruppen aufgeteilt und die Augenlängen < 24 mm und Augenlängen ≥ 24 mm separat betrachtet und analysiert, welche in der Abbildung 9 und Abbildung 10 genauer veranschaulicht werden. Dies dient der genaueren Interpretation der gemessenen Werte. Ebenso wurden die Regressionsgeraden y und R^2 in Excel erstellt.

$$y = -0,6787x + 15,07$$

$$R^2 = 0,1026$$

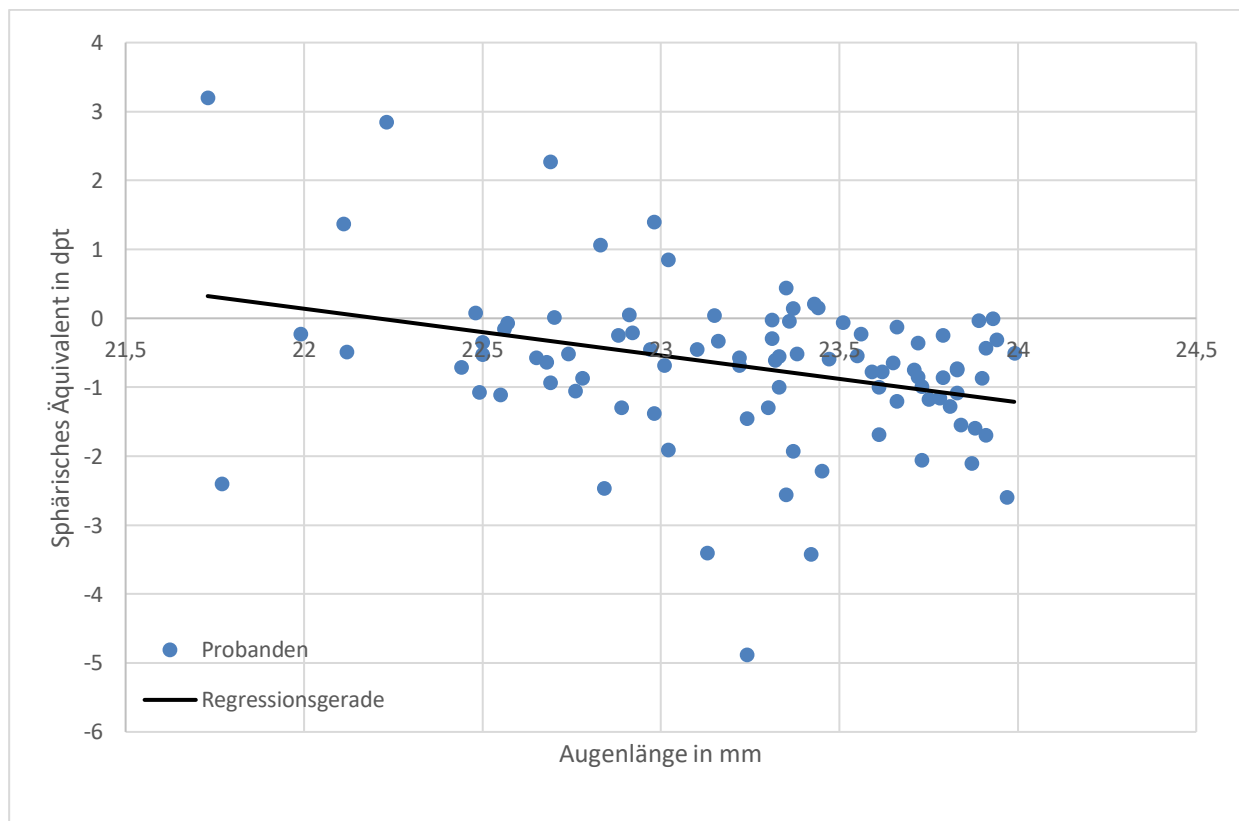


Abbildung 9 Verteilung der Augenlängen < 24 mm

$$y = -1,9278x + 45,612$$

$$R^2 = 0,4484$$

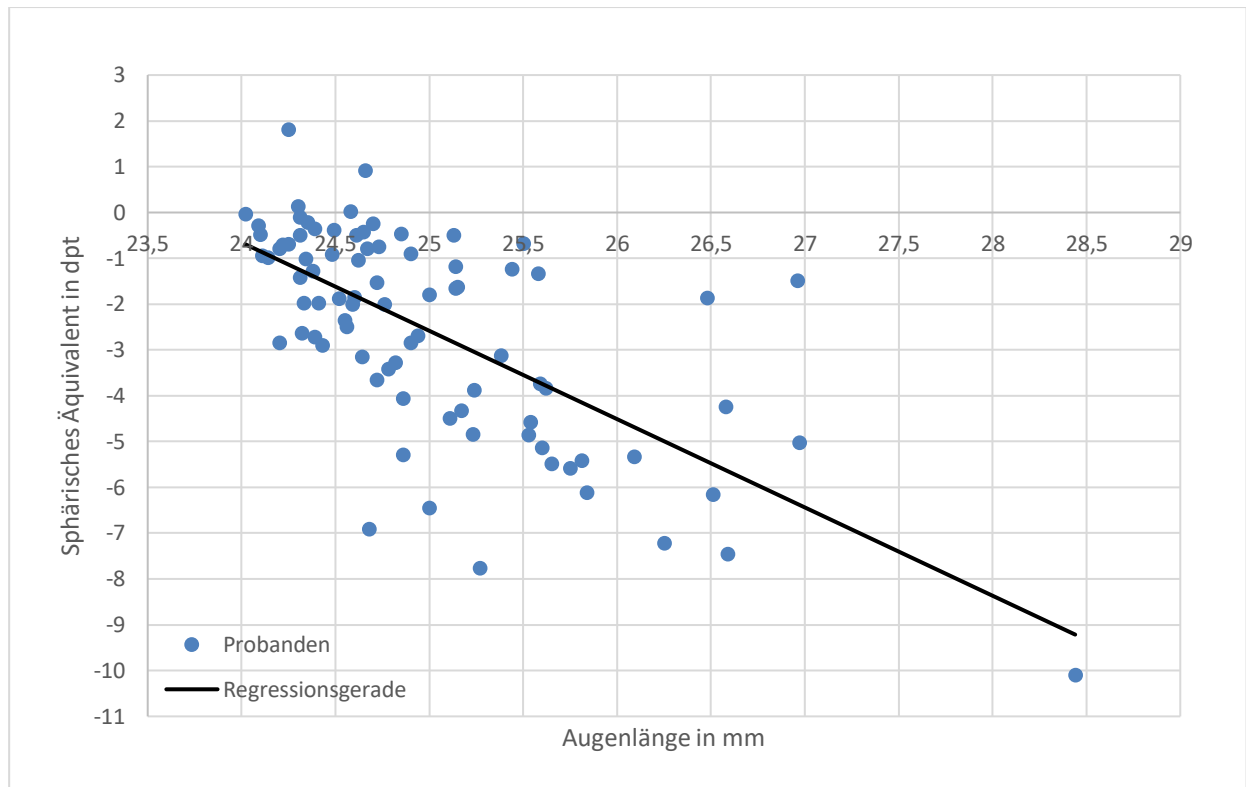


Abbildung 10 Verteilung der Augenlängen ≥ 24 mm

4.2 Sphärisches Äquivalent und die Vorderkammertiefe

Aus der Gesamtstichprobe ergibt die mittlere Vorderkammertiefe $3,59 \pm 0,29$ mm und einen Median von 3,61 mm. Zur Veranschaulichung des Zusammenhangs zwischen der Vorderkammertiefe und dem Sphärischen Äquivalent wurde das folgende Diagramm erstellt. Die Geradengleichung der Regressionsgeraden y und der Wert R^2 wurden mit Excel ermittelt.

$$y = -1,9998x + 5,6075$$

$$R^2 = 0,0813$$

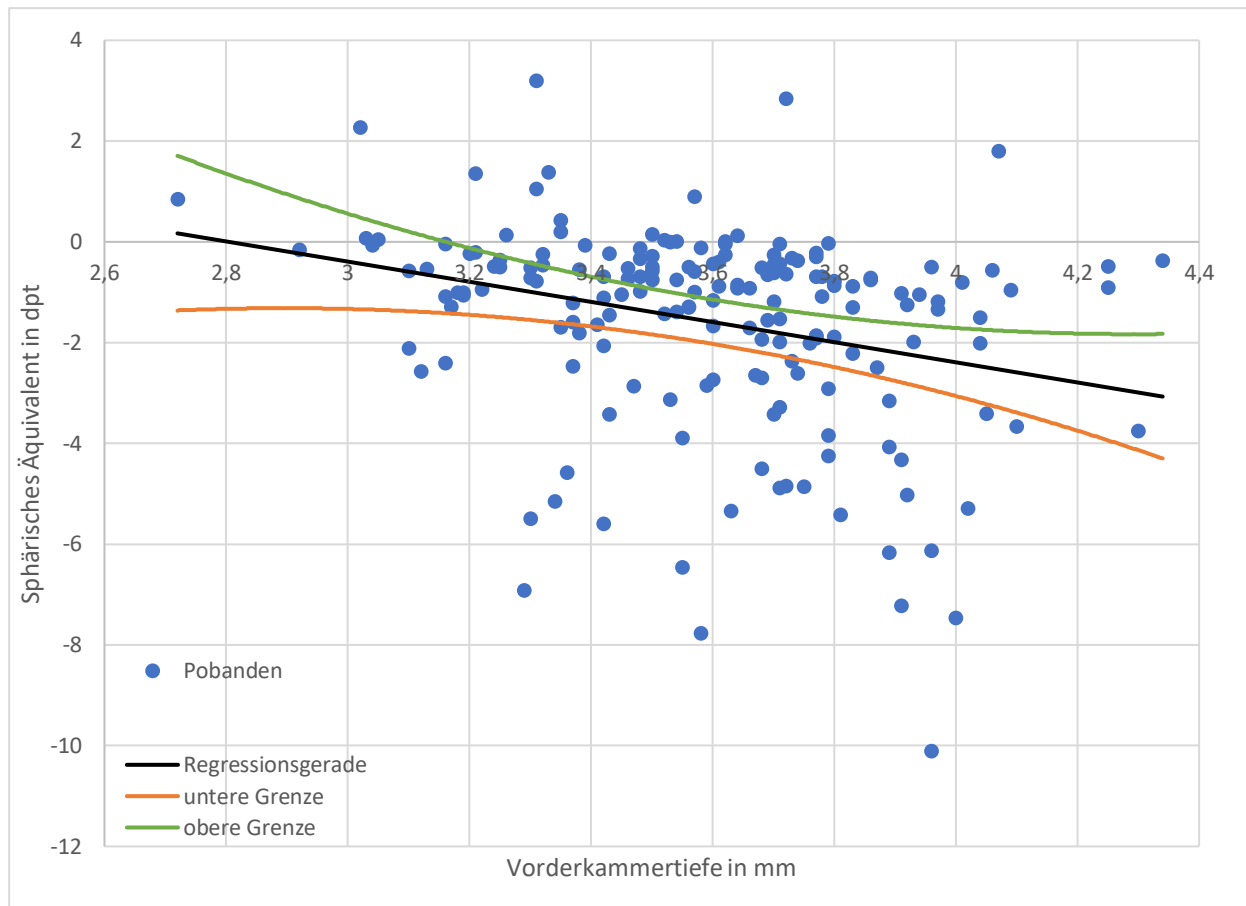


Abbildung 11 Verteilung der Vorderkammertiefe und des SÄ

Der Auszug des Rangkorrelationstestes nach Spearman aus dem Programm „R“ ergab folgende Ergebnisse. Der p-value beträgt 9.753e-06 und der rho-Wert ergibt aufgerundet -0.32.

```
Spearman's rank correlation rho

data:  y1 and x2
S = 1265400, p-value = 9.753e-06
alternative hypothesis: true rho is not equal to 0
sample estimates:
      rho
-0.3238744

Warnmeldung:
In cor.test.default(y1, x2, method = "spearman") :
  Kann exakten p-Wert bei Bindungen nicht berechnen
```

Abbildung 12 Rangkorrelation nach Spearman VT und SÄ

4.3 Augenlänge und Vorderkammertiefe

Zuletzt werden die Vorderkammertiefe und die Augenlänge gegenübergestellt und graphisch visualisiert. Die dabei entstandene Regressionsgerade y , der R^2 Wert und das 99,5 %Konfidenzintervall wurden mittels Excel errechnet.

$$y = 0,1323x + 0,4102$$

$$R^2 = 0,2628$$

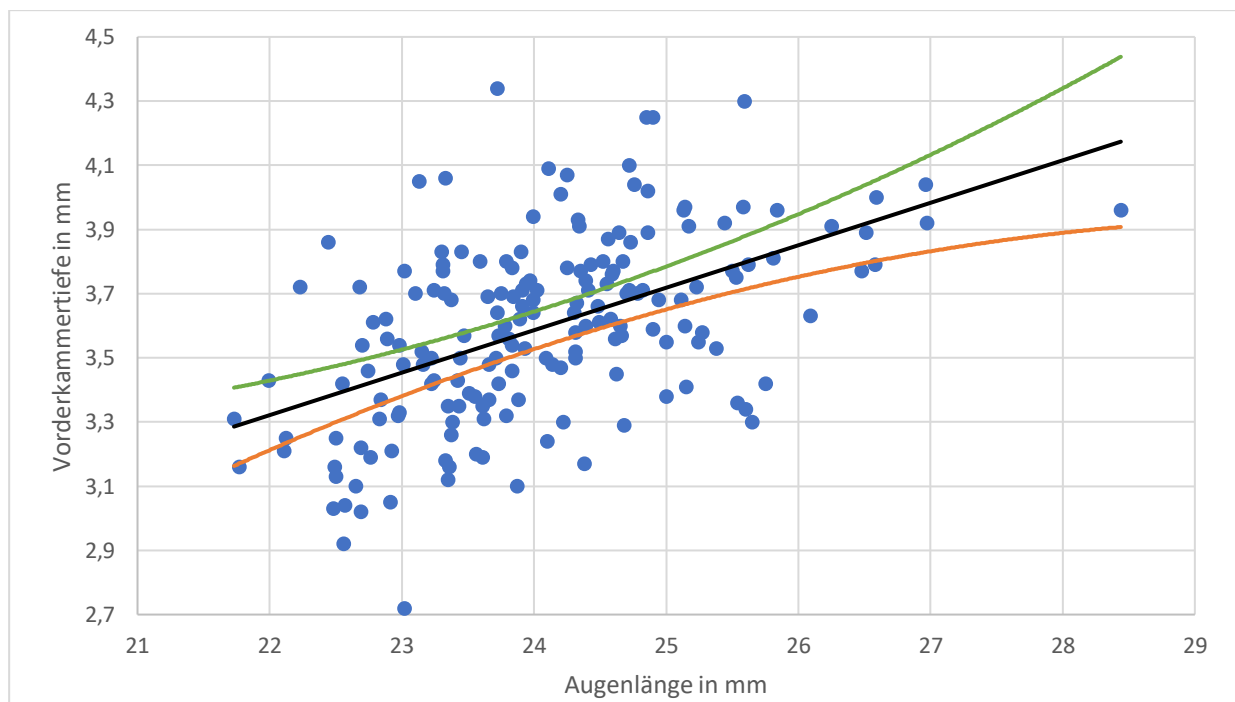


Abbildung 13 Verteilung der Vorderkammertiefe und Augenlänge

Zuzüglich wurde in R ein Rangkorrelation Test nach Spearman durchgeführt, um den exakten Wert der Korrelation bestimmen zu können, welcher der Abbildung 14 zu entnehmen ist.

```
Spearman's rank correlation rho

data:  x2 and x1
S = 459960, p-value = 1.01e-13
alternative hypothesis: true rho is not equal to 0
sample estimates:
      rho
0.5188032

Warnmeldung:
In cor.test.default(x2, x1, method = "spearman") :
  Kann exakten p-Wert bei Bindungen nicht berechnen
```

Abbildung 14 Rangkorrelation nach Spearman AL und VT

5 Diskussion

Im Folgenden werden die Methoden und die Ergebnisse kritisch gegenübergestellt, analysiert und Fehlerquellen, die bei den Messungen entstanden sind, erläutert.

5.1 Methode

Die unterschiedliche Verteilung des Geschlechts, der Größe und des Alters der Probanden basiert auf einem Zufallsprinzip. Dabei ist anzumerken, dass die Untersuchung in einer Hochschuleinrichtung stattfand, wodurch das mittlere Probandenalter $24,03 \pm 5,13$ Jahre beträgt.

Das persönliche Ansprechen der Probanden erwies eine höhere Erfolgsquote gegenüber der Werbung der schriftlichen Form (z.B. Plakat und Social Media). Bei einem persönlichen Kontakt und Ansprache wurden die Probanden zu der Teilnahme an der Studie motiviert und das Risiko einer Absage wurde somit verringert. Demnach wurden die Probanden schon im Voraus über Ziele der Studie informiert.

Die Untersuchung wurde in einem Raum durchgeführt, der nicht komplett abgedunkelt werden konnte. Aus diesem Grund war die Beleuchtung tagesabhängig und konnte nicht konstant gehalten werden. Dies könnte den maximalen Pupillendurchmesser und die davon abhängigen Werte beeinflusst haben.

Ebenso die Position und die Zentrierung des Auges, sowie die Störreflexe, Lider, Wimpern, Augenbrauen oder Haare, könnten einen Fehlintikator darstellen, der die Ergebnisse hätte verändern können. Trotz der genauen Anweisung an den Probanden, das Fixierobjekt zu fokussieren, ist ein ungenaues Ergebnis nicht auszuschließen, da die Werte auf Grund der eben genannten Faktoren hätten verfälscht werden können. Sowohl ein sehr hoher Hornhautastigmatismus als auch hohe Hornhautunregelmäßigkeiten sind im Stande, ein falsches Ergebnis zu liefern.

Der IOL Master 500 wurde jeden Tag vor der Messung kalibriert, um möglichst genaue Ergebnisse zu erzielen. Der i.Profiler hingegen konnte vor den Messungen, aufgrund technischer Schwierigkeiten, nicht neu kalibriert werden. Dadurch war das Gerät möglichen Abweichungen ausgesetzt.

5.2 Ergebnisse

Zunächst werden die Ergebnisse der Augenlänge und des Sphärischen Äquivalents, dann der Vorderkammertiefe und im Anschluss die Ergebnisse der Vorderkammertiefe und der Augenlänge erläutert.

Bei einer Probandenzahl von 179 Personen können eine statistisch relevante Aussage gemacht und ein Bezug zur Allgemeinheit hergestellt werden. Das Diagramm und die Regressionsgerade veranschaulichen deutlich, dass bei einer zunehmenden Augenlänge der Wert des Sphärischen Äquivalents sinkt und eine zunehmende Myopisierung stattfindet. Der Regressionsgeraden zufolge erfolgt auf einen Millimeter Achslängenunterschied eine Änderung des SÄ von 1,2237 dpt. Aus der statistischen Auswertung mit „R“ ergibt sich der p-value von $< 2.2e-16$, welcher einen höchst signifikanten Stellenwert mit sich zieht, und ein rho-Wert von -0.59, welcher (Vgl. Buser A., 2015, S. 52, ff.) eine negative mittlere Korrelation angibt und somit einen mittleren negativen Zusammenhang ergibt. Mit dieser Auswertung kann die Studie von Bayha, C; et al. (2018), die zu einem ähnlichen Ergebnis gelangt sind, bestätigt werden. Werden die Augenlängen in zwei Gruppen, jeweils in kürzere (< 24 mm) und längere (≥ 24 mm) Augen unterteilt, so kristallisiert sich ein deutlicher Unterschied. Betrachtet man die längeren Augen und deren zugehörige Regressionsgerade, so ergibt sich bei einem Millimeter Augenlängenunterschied eine Änderung des SÄ um 1,9278 dpt. Die Gruppe mit den kürzeren Augen dagegen erreicht bei einem Millimeter Unterschied eine Änderung von nur 0,6787 dpt.

Betrachtet man das Diagramm der Vorderkammertiefe in Bezug zum Sphärischen Äquivalent, so kann mittels einer Regressionsgeraden eine Korrelation vermutet werden. Der mit R errechnete p-value beträgt $9.753e-06$, was ein höchst signifikantes Ergebnis des Tests bestätigt. Der rho-Wert von ca. -0.32 ergibt eine

geringe negative Korrelation. Dies gibt Auskunft darüber, dass ein deutlicher Zusammenhang beider Variablen ausgeschlossen werden kann. Dies gilt besonders für sehr hoch Hyperope und sehr hoch Myope Augen. Eine Statistik (Vgl. Stavridis, E., 2012, S. 67-70) bestätigt, dass „[...] der refraktive Status des Auges [...] offensichtlich keine wesentliche Rolle für die VKT [...]“ spielt. Dennoch ist die Vorderkammer ein Teil der Gesamtlänge des Auges und somit davon abhängig (Vgl. Hoffmann P. C., 2009, S 219). Besonders deutlich wird diese Erkenntnis durch die Überprüfung auf Korrelation der Vorderkammertiefe und der Augenlänge. Das R Statistikprogramm berechnet einen höchstsignifikanten p-Wert von $1.01e-13$ und einen rho Wert von ca. 0,52, was eine positive mittlere Korrelation aussagt. Die dazugehörige Regressionsgerade weist ebenso darauf, dass bei einer Zunahme der Augenlänge um ein mm, die Vorderkammer um 0,1323 mm zunimmt.

6 Schlussfolgerung

Schlussfolgernd konnten alle in dieser Studie gesetzten Ziele umgesetzt und Fragestellungen beantwortet werden. Es wurden letztendlich 200 volljährige Probanden an den Geräten i.Profiler und Biometer IOL Master 500 vermessen, von denen 179 die Einschlusskriterien erfüllten und deren Werte zur Analyse und Weiterverarbeitung vom Untersucher freigegeben wurden. Somit wurde das Hauptziel erreicht.

Eine der Fragestellungen bezog sich insbesondere auf die Korrelation der Augenlänge und der Fehlsichtigkeit, welche in Form des Sphärischen Äquivalents definiert wurde. In dem Sinne konnte die Fragestellung und dessen Faustregel teilweise bestätigt werden. Betrachtet man alle berücksichtigten Probanden und deren Augenlängen, kann, wie oben bereits beschrieben worden, ein Zusammenhang beobachtet werden. Werden jedoch die kürzeren Augenlängen (<24 mm) mit längeren Augenlängen (≥ 24 mm) verglichen und separat betrachtet, kristallisiert sich ein deutlicher Unterschied. Die Gruppe mit längeren Augen erweist pro mm Augenlängenänderung 1,9278 dpt Abweichung, während die Gruppe mit kürzeren Augen, pro mm Änderung nur 0,6787 dpt erreicht. Anhand der Resultate kann die Faustregel, die besagt, dass ein Millimeter Augenlängenänderung drei Dioptrien entspricht, in der Praxis nicht komplett bestätigt werden. Vor allem die kürzeren Augen weichen deutlich von der Faustregel ab. Betrachtet man die Extremwerte, so kennzeichnen sich hier ebenso deutliche Abweichungen vom Standardauge von Gullstrand, was nur die menschliche Individualität bestätigt. Darüber hinaus wurden beim standardisierten Gullstrand-Auge mehrere tausende Augen gemessen, dessen Werte standardisiert und vereinfacht wurden, um optische Berechnungen zu erleichtern, die in der Wissenschaft eingesetzt werden.

Die Betrachtung der Korrelation der Vorderkammertiefe und der Fehlsichtigkeit, ergab, wie bereits vermutet, keine neue Erkenntnis. Die Schwankungen zwischen den Werten lassen sich nur schwer der genauen Änderung des SÄ zuordnen, wodurch die Aussage getroffen werden kann, dass die Länge der Vorderkammertiefe die Ametropie des Auges in geringer Weise beeinflusst. Abschließend konnte die Korrelation der Augenlänge und der Vorderkammertiefe, trotz der geringen Schwankungen zwischen den Werten, bestätigt werden, worauf sich bereits die Studie von Stavridis, E. (S.40) stützt.

7 Ausblick

Die resultierenden Ergebnisse der Studie können für weitere Forschungszwecke genutzt und ergänzt werden. Die Methode ist reproduzierbar und kann eventuell auf andere Alters- und Personengruppen, mit einer viel größeren Fallzahl, angewendet werden. Ebenso können die Abbildungsfehler beurteilt und analysiert werden, sofern der Pupillendurchmesser auf die gleiche Größe heruntergerechnet wird. Zur Ergänzung des individuellen Augenmodells kann ein weiterer Wert, wie zum Beispiel die Hornhautdicke, hinzugefügt werden. Dieser wurde in der Studie nicht berücksichtigt und kann als zusätzliches Medium dienen.

Literaturverzeichnis

Bayha, Constanze; Bretz, Matthias; Grau, Damaris; Michel, Helena: Ermittlung des Zusammenhanges zwischen der Achslänge, der Hornhautradien und der Refraktion des Auges, Aalen 2018. (= Bayha,C.; Bretz, M.; Grau,D.; Michel,H., 2018)

Binder, Sebastian: Fingerabdruckerkennung bei Zutrittskontrolle und Zeiterfassung – Vergleich mit anderen biometrischen Technologien, Mannheim 2018, <https://www.almasindustries.de/fingerabdruckerkennung-bei-zutrittskontrolle-und-zeiterfassung/>, zuletzt eingesehen am 23.10.2019.

Bortz, Jürgen; Schuster, Christof: Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler, 7. Auflage, Springer Verlag Berlin Heidelberg 2010, S. 183-198. (= Bortz, J.; Schuster, C., 2010)

Buser, Annemarie: Statistik Wintersemester 2015/2016, Aalen 2015 (= Buser A., 2015)

Goersch, Helmut: Handbuch für Augenoptik, 4. Auflage, Oberkochen 2000. (= Goersch, 2000)

Hoffmann, P. C.: Biometrieergebnisse von 23.239 Augen, 2009, http://www.dgii.org/uploads/jahresband/2009/124_Hoffmann.pdf, zuletzt eingesehen 20.10.2019. (= Hoffmann, P. C., 2008)

Karimian, Farid, MD; Feizi, Sepehr, MD; Doozande, Azade, MD: Higher-Order Aberrations in Myopic Eyes, Tehran 2010. (= Karimian, F, et al. 2010)

Lang, Gerhard K.; Lang, Gabriele E.: Augenheilkunde essentials, Stuttgart 2015 (= Lang, 2015)

Moorhead Patrick: [Editorial] Iris Scanning Brings Added Security to Mobile, 18. August 2016, <https://news.samsung.com/global/editorial-iris-scanning-brings-added-security-to-mobile>, zuletzt eingesehen am 23.10.2019.

Müller-Treiber, Andrea: Kontaktlinsen Know-How, 3. Auflage, Heidelberg 2013. (= Müller-Treiber 2013)

Mutti, Donald O.; Mitchell, G. Lynn; Jones, Lisa A.; Friedman, Nina E.; Frane, Sara L.; Lin, Wendy K. et al.: Axial growth and changes in lenticular and corneal power during emmetropization in infants, in: Investigative ophthalmology & visual science Vol. 46 H. 9, (2005), S. 3074–3080. DOI: 10.1167/iovs.04-1040. (= Mutti, D.; Mitchell, G. et al., 2005)

Paquin, Marie-Pierre OD; Hamam, Habib, Ing, PhD; Simonet, Pierre, OD, MSc, PhD, FAAO: Objective Measurement of Optical Aberrations in Myopic Eyes, Québec, in: Optometry and Vision Science, Vol. 79, H. 5, (2002), S. 285-291. (= Paquin, M; et al., 2002)

Plainis S.; Pallikaris I.G., Ocular monochromatic aberration statistics in a large emmetropic population, Heraklion, in: Journal of Modern Optics Vol. 55, H. 4–5, (2008), S. 759–772. DOI: 10.1080/09500340701469831. (= Plainis, S.; Pallikaris, I.G., 2007)

Stavridis, Evangelos: Reliabilität und Reproduzierbarkeit von Pentacam und IOL-Master für die Biometrie des Auges, Saarland 2012, <https://dnb.info/1053032099/34>, zuletzt eingesehen am 20.10.2019. (= Stavridis, E., 2012)

Zwerenz, Karlheinz: Statistik-Datenanalyse mit EXCEL und SPSS, 3. Auflage, München 2006. (= Zwerenz, 2006)

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Messung mit dem i.Profiler	9
Abbildung 2 2D Modell der Kornealen Wellenfront	10
Abbildung 3 Messung mit dem IOL Master 500	11
Abbildung 4 Alter der Probanden	14
Abbildung 5 Körpergröße der Probanden.....	14
Abbildung 6 Verteilung des Sphärischen Äquivalents	15
Abbildung 7 Verteilung der Augenlänge und des SÄ	16
Abbildung 8 Rangkorrelation nach Spearman AL und SÄ	
Abbildung 9 Verteilung der Augenlängen <24 mm.....	17
Abbildung 10 Verteilung der Augenlängen ≥ 24 mm	18
Abbildung 11 Verteilung der Vorderkammertiefe und des SÄ	19
Abbildung 12 Rangkorrelation nach Spearman VT und SÄ	
Abbildung 13 Verteilung der Vorderkammertiefe und Augenlänge	20
Abbildung 14 Rangkorrelation nach Spearman AL und VT	21

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Werte des i.Profilers.....	9
Tabelle 2 Statistische Größen der Probanden.....	13

Anhang

Alle Daten wurden in Form einer Excel-Datei auf einer CD gespeichert.

Fragebogen

Probanden-Nr.: _____

Datum: _____

Vor- und Nachname: _____

Geschlecht (m/w): _____

Geburtsdatum/Alter (mind. 18J.): _____

Körpergröße (cm): _____

Augenvorgeschichte:

Sind bei Ihnen eine oder mehrere der folgenden Erkrankungen festgestellt worden?

☐ Glaukom☐ Augenverletzung/-operation☐ Katarakt☐ Trauma☐ Augeninfektion☐ Allgemeinerkrankung (Diabetes, Bluthochdruck, etc.)☐ Laseroperation☐ Sonstiges: _____

Unterschrift: _____

Datenschutzerklärung

Ziel der Studie

Das Ziel meiner Untersuchung besteht darin, zu erfahren, inwiefern sich die Anatomie des Auges auf die Sehstärke auswirkt.

Ablauf der Messung

Zuerst wird der ausgehändigte Fragebogen vollständig und wahrheitsgemäß vom Probanden ausgefüllt und an den Untersucher zurückgegeben. Danach erfolgt eine Messung mit dem IOL-Master 500, der die Augenlänge und die Position der Linse bestimmt und dem i.Profiler, der Abbildungsfehler des Auges ermittelt. Beide Messungen sind nicht-invasiv.

Auf jeglichen Einfluss von pharmazeutischer Mittel (z.B. Augentropfen) und mechanischen Kontakt wird dabei verzichtet.

Die Dauer der Messungen beträgt ca. 15 Minuten.

Datenschutz

Zur Durchführung der Bachelorarbeit werden folgende Daten von Ihnen aufgenommen:

- Vor- und Nachname
- Geschlecht
- Geburtsdatum/Alter
- Ethnischer Hintergrund
- Körpergröße
- Augenvorgeschichte
- Messdaten

Mit der anonymisierten Verwendung dieser Daten zum angegebenen Zweck erklären Sie sich hiermit einverstanden. Die Daten werden an keinen Dritten weitergegeben und sämtliche Vorschriften des Bundesdatenschutzgesetzes werden beachtet.

Freiwilligkeit der Teilnahme, Risiken, Rücktrittsrecht ohne nachteilige Folgen

Die Teilnahme an dieser Studie ist für Sie als Proband freiwillig. Sie können Ihre Entscheidung jederzeit ohne Nachweis von Gründen und ohne Nachteile für Sie widerrufen.

Falls Sie mit einer Teilnahme einverstanden sind, bitte ich Sie, die Einverständniserklärung zu unterzeichnen.

Mit meiner Unterschrift stimme ich (Name, Vorname in Druckbuchstaben),

der Verwendung meiner Daten nach der oben genannten Datenschutzerklärung zu.

Ort, Datum

Unterschrift

Kontaktaufnahme bei der Durchführung zukünftiger Projektarbeiten

Hiermit bestätige ich, dass ich mich als Proband im Falle weiterer Studien zur Verfügung stellen möchte. Ich bitte um Kontaktaufnahme über:

- Telefon/Handy: _____
- E-Mail: _____

Ort, Datum

Name, Vorname

Unterschrift