

Bachelorstudiengang
(B.Sc.) Augenoptik/Optometrie
an der Hochschule Aalen

Genauigkeit und Reproduzierbarkeit des Smartphone-gestützten Refraktionssystems EyeNetra im Vergleich zu der herkömmlichen Refraktion

Bachelorthesis zur Erlangung des akademischen Grades
Bachelor of Science B.Sc.

Vorgelegt von:
Marvin Seiche

Betreut von:
Prof. Dr. Peter Baumbach, Hochschule Aalen
Dr. Anne Seidemann, Rodenstock

September 2022

Abstract

Aus Gründen der besseren Lesbarkeit wird in dieser Bachelorarbeit auf die gleichzeitige Verwendung der Sprachformen männlich, weiblich und divers (m/w/d) verzichtet. Sämtliche Formulierungen gelten gleichermaßen für alle Geschlechter.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Ermittlung der Genauigkeit und Reproduzierbarkeit des Smartphone-gestützten, mobilen Refraktionssystems EyeNetra im Vergleich zur herkömmlichen Refraktion mit dem DNEye Scanner und dem Phoropter. Zudem wird die Messgenauigkeit von Netra mit einem auf einem ähnlichen Messprinzip basierenden Gerät namens EyeQue verglichen.

Für die Durchführung dieser Studie wurden 25 Probanden beidäugig innerhalb eines Termins am DNEye Scanner, Phoropter, Netra und dem Netropter refraktiert. Fünf Probanden wurden zusätzlich an einem zweiten Termin zwei zusätzliche Male mit EyeNetra gemessen, um die Reproduzierbarkeit der refraktiven Ergebnisse mit Hilfe der Statistiksoftware SPSS ermitteln zu können.

Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen, dass das mobile Autorefraktometer Netra im Vergleich zum Phoropter $-0,36$ dpt (SD = $0,81$ dpt) myopere Ergebnisse im sphärischen Äquivalent misst. Ebenfalls myoper misst Netra im Vergleich zum DNEye Scanner $-0,29$ dpt (SD = $0,67$ dpt). Die Differenzen zwischen Netra und dem Netropter zeigen, dass Netra $-0,46$ dpt (SD = $0,81$ dpt) myoper misst und beim Vergleich zwischen dem Netropter und dem herkömmlichen Phoropter ergibt sich, dass der Netropter leicht hyperope Ergebnisse misst (M = $+0,12$ dpt, SD = $0,41$ dpt).

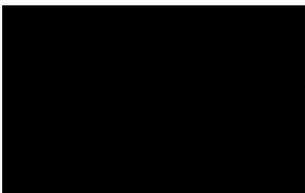
Für die Wiederholungsmessungen von Netra und dem Netropter werden jeweils die größtmöglichen Differenzen gebildet, um ein Bild von den größten vorkommenden Messdifferenzen zu erhalten. Netra hat eine mittlere Differenz von $-0,39$ dpt (SD = $0,24$ dpt) und der Netropter eine durchschnittliche Differenz von $-0,49$ dpt (SD = $0,25$ dpt).

Schlussfolgernd eignet sich das EyeNetra System in Kombination aus Netra und dem Netropter für eine komplette Refraktion mit guter Messgenauigkeit. Netra selbst eignet sich hierbei primär für die Bestimmung von Vorwerten bei einer einfachen, vom Probanden schnell verstandenen Messung.

Erklärung

Hiermit bestätige ich, dass die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst wurde. Es wurden alle Stellen, welche wörtlich oder sinngemäß aus Veröffentlichungen oder anderen Quellen entnommen sind, als solche eindeutig kenntlich gemacht. Die Arbeit wurde noch keiner anderen Prüfbehörde vorgelegt und noch nicht in gleicher oder ähnlicher Form veröffentlicht.

Aalen, 30. September 2022



A solid black rectangular box redacting the signature, with a horizontal line extending to the right from its right edge.

Danksagung

Ich bedanke mich herzlich für die Betreuung durch Herrn Prof. Dr. Peter Baumbach, welcher mir das behandelte Thema vorgeschlagen hatte. Außerdem bedanke ich mich bei Frau Dr. Anne Seidemann und Herrn Yohann Bénard von der Rodenstock GmbH für die Betreuung per online-Meetings sowie dem Beiseitestehen bei fachlichen und statistischen Fragen. Ein großer Dank geht an die Studentinnen und Studenten aller Semester der Augenoptik an der Hochschule Aalen, welche sich so kurz vor den Semesterferien den Messungen unterzogen haben. Ebenfalls möchte ich Herrn Michels danken, ohne dessen hohe refraktive Kompetenzen das schnelle Erlernen der Zylinder-Nebel-Methode deutlich schwieriger und langwieriger gewesen wäre.

Inhaltsverzeichnis

Abstract	I
Erklärung	II
Danksagung	III
Verzeichnis der Abkürzungen.....	VI
Verzeichnis der Abbildungen	VII
Verzeichnis der Tabellen	IX
Verwendete Formelzeichen	XI
1. Einleitung	1
2. Forschungsstand.....	3
2.1. „Comparing the Netra smartphone refractor to subjective refraction“	3
2.2. „Zur Reproduzierbarkeit von Refraktionsbestimmungen“	4
2.3. EyeQue.....	4
3. Material und Methoden	6
3.1. Herkömmliche objektive Refraktion am DNEye Scanner	6
3.2. Stichprobengröße und Ein-/ Ausschlusskriterien	6
3.3. Messablauf	8
3.4. Herkömmliche subjektive Refraktion am Phoropter	8
3.5. Automatische Refraktion mit Netra	9
3.6. Subjektive Refraktion mit dem Netropter	11
3.7. Zylinder-Nebel-Methode	12
3.8. Power-Vektor-Analyse	13
3.9. Statistische Auswertung	15
4. Ergebnisse	18
4.1. Prüfung auf Normalverteilung	18
4.1.1. Prüfung auf Normalverteilung: sphärisches Äquivalent	18
4.1.2. Prüfung auf Normalverteilung: J_0	20

4.1.3.	Prüfung auf Normalverteilung: J_{45}	21
4.2.	ANOVAs: Einfaktorielle Varianzanalysen mit Messwiederholungen	23
4.2.1.	ANOVA: sphärische Äquivalente	23
4.2.2.	ANOVA: J_0	25
4.2.3.	ANOVA: J_{45}	28
4.3.	Mittelwerte der Differenzen im Vergleich zwischen den Geräten.....	30
4.4.	Ergebnisse der Wiederholungsmessungen	33
4.5.	t-Test der Wiederholungsmessungen von Netra.....	36
5.	Diskussion.....	37
5.1.	Netra und DNEye Scanner im Vergleich.....	37
5.2.	Netra und Phoropter im Vergleich.....	37
5.3.	Netra und Netropter im Vergleich	38
5.4.	Netropter und Phoropter im Vergleich	38
5.5.	Diskussion der Wiederholungsmessungen	39
5.6.	Netra und EyeQue im Vergleich	41
6.	Schlussfolgerung.....	43
	Literatur	45
	Anhang	XII

Verzeichnis der Abkürzungen

ANOVA	Varianzanalyse (Analysis of Variance)
BSG	Bestes sphärisches Glas
dpt	Dioptrie
HOA	High Order Aberrations
ZNM	Zylinder-Nebel-Methode
M	Mittelwert
SD	Standardabweichung

Verzeichnis der Abbildungen

Abbildung 1: DNEye Scanner der Rodenstock GmbH.....	6
Abbildung 2: Herkömmlicher Phoropter der American Optical Corporation	9
Abbildung 3: Probandin bei einer automatischen Refraktion mit Netra	9
Abbildung 4: Testmuster von Netra. Die langen Linien des roten und des grünen Schirms müssen übereinander gebracht werden	10
Abbildung 5: Netra (Vordergrund) mit zugehörigem Smartphone und dem Netropter (Hintergrund)	11
Abbildung 6: abgebildete Strahlenfigur, während der ZNM, die angezeigten Achslagen entsprechen den zu 90° verdrehten Achslagen des Probanden	12
Abbildung 7: Normalverteilungskurve für die sphärischen Äquivalente des DNEye Scanners, rechte Augen	19
Abbildung 8: Normalverteilungskurve für die sphärischen Äquivalente des Phoropters, rechte Augen.....	19
Abbildung 9: Normalverteilungskurve für die sphärischen Äquivalente von Netra, rechte Augen	19
Abbildung 10: Normalverteilungskurve für die sphärischen Äquivalente des Netropters, rechte Augen.....	19
Abbildung 11: Normalverteilungskurve für J_0 des DNEye Scanners, rechte Augen .	20
Abbildung 12: Normalverteilungskurve für J_0 des Phoropters, rechte Augen	20
Abbildung 13: Normalverteilungskurve für J_0 von Netra, rechte Augen	20
Abbildung 14: Normalverteilungskurve für J_0 des Netropters, rechte Augen	20
Abbildung 15: Normalverteilungskurve für J_{45} des DNEye Scanners, rechte Augen	22
Abbildung 16: Normalverteilungskurve für J_{45} des Phoropters, rechte Augen	22
Abbildung 17: Normalverteilungskurve für J_{45} von Netra, rechte Augen.....	22
Abbildung 18: Normalverteilungskurve für J_{45} des Netropters, rechte Augen	22
Abbildung 19: Mittelwerte und Standardabweichung des DNEye Scanners, Phoropters, Netra und Netropters für die sphärischen Äquivalente, rechte Augen, $n = 25$	23
Abbildung 20: Mittelwerte und Standardabweichung des DNEye Scanners, Phoropters, Netra und Netropters für J_0 , rechte Augen, $n = 25$	26
Abbildung 21: Mittelwerte und Standardabweichung des DNEye Scanners, Phoropters, Netra und Netropters für J_{45} , rechte Augen, $n = 25$	28

Abbildung 22: Boxplots zu den Differenzen Netra – Phoropter im sphärischen Äquivalent $S\ddot{A}$, J_0 und J_{45} , $n = 25$	31
Abbildung 24: Boxplots zu den Differenzen Netra – DNEye Scanner im sphärischen Äquivalent, J_0 und J_{45} , $n = 25$	31
Abbildung 25: Boxplots zu den Differenzen Netra – Netropter im sphärischen Äquivalent, J_0 und J_{45} , $n = 25$	32
Abbildung 26: Boxplots zu den Differenzen Netropter – Phoropter im sphärischen Äquivalent, J_0 und J_{45} , $n = 25$	33
Abbildung 27: Boxplots zu den Differenzen der Wiederholungsmessungen von Netra in $S\ddot{A}$, J_0 und J_{45} , $n = 10$	34
Abbildung 28: Boxplots zu den Differenzen der Wiederholungsmessungen des Netropters in $S\ddot{A}$, J_0 und J_{45} , $n = 10$	34
Abbildung 29: Boxplots zu den dioptrischen Abstände der Wiederholungsmessungen von Netra und dem Netropter, $n = 10$	35
Abbildung 30: Normalverteilungskurve für die sphärischen Äquivalente des DNEye Scanners, linke Augen.....	XVIII
Abbildung 31: Normalverteilungskurve für die sphärischen Äquivalente des Phoropters, linke Augen	XVIII
Abbildung 32: Normalverteilungskurve für die sphärischen Äquivalente von Netra, linke Augen.....	XVIII
Abbildung 33: Normalverteilungskurve für die sphärischen Äquivalente des Netropters, linke Augen	XVIII
Abbildung 34: Normalverteilungskurve für J_0 des DNEye Scanners, linke Augen ...	XIX
Abbildung 35: Normalverteilungskurve für J_0 des Phoropters, linke Augen	XIX
Abbildung 36: Normalverteilungskurve für J_0 von Netra, linke Augen.....	XIX
Abbildung 37: Normalverteilungskurve für J_0 des Netropters, linke Augen.....	XIX
Abbildung 38: Normalverteilungskurve für J_{45} des DNEye Scanners, linke Augen...	XX
Abbildung 39: Normalverteilungskurve für J_{45} des Phoropters, linke Augen.....	XX
Abbildung 40: Normalverteilungskurve für J_{45} von Netra, linke Augen	XX
Abbildung 41: Normalverteilungskurve für J_{45} des Netropters, linke Augen	XX

Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 1: Ergebnisse des Shapiro-Wilk-Tests für SÄ, rechte Augen, n = 25	19
Tabelle 2: Ergebnisse des Shapiro-Wilk-Tests für J ₀ , rechte Augen, n = 25	21
Tabelle 3: Ergebnisse des Shapiro-Wilk-Tests für J ₄₅ , rechte Augen, n = 25	22
Tabelle 4: Mauchly-Test auf Sphärizität der SÄ, rechte Augen, n = 25	24
Tabelle 5: Tests der Innersubjekteffekte des sphärischen Äquivalents, rechte Augen, n = 25	24
Tabelle 6: Paarweise Vergleiche der sphärischen Äquivalente aller vier Messungen, rechte Augen, n = 25 1: DNEye Scanner, 2: Phoropter, 3: Netra, 4: Netropter	25
Tabelle 7: Mauchly-Test auf Sphärizität von J ₀ , rechte Augen, n = 25	26
Tabelle 8: Tests der Innersubjekteffekte für J ₀ , rechte Augen, n = 25	27
Tabelle 9: Paarweise Vergleiche von J ₀ aller vier Messungen, rechte Augen, n = 25 1: DNEye Scanner, 2: Phoropter, 3: Netra, 4: Netropter.....	27
Tabelle 10: Mauchly-Test auf Sphärizität von J ₄₅ , rechte Augen, n = 25	29
Tabelle 11: Tests der Innersubjekteffekte für J ₄₅ , rechte Augen, n = 25.....	29
Tabelle 12: Paarweise Vergleiche von J ₄₅ aller vier Messungen, rechte Augen, n = 25 1: DNEye Scanner, 2: Phoropter, 3: Netra, 4: Netropter.....	30
Tabelle 13: paarweiser t-Test zwischen den Wiederholungsmessungen von Netra mit den größten dioptrischen Abständen.....	36
Tabelle 14: originale Messdaten mit dem DNEye Scanner für rechte und linke Augen	XII
Tabelle 15: originale Messdaten mit dem Phoropter für rechte und linke Augen.....	XIII
Tabelle 16: originale Messdaten mit Netra für rechte und linke Augen.....	XIV
Tabelle 17: originale Messdaten mit dem Netropter für rechte und linke Augen.....	XV
Tabelle 18: originale Messdaten der Wiederholungsmessungen mit Netra für rechte und linke Augen.....	XVI
Tabelle 19: originale Messdaten der Wiederholungsmessungen mit dem Netropter für rechte und linke Augen	XVII
Tabelle 20: Ergebnisse des Shapiro-Wilk-Tests für SÄ, linke Augen	XVIII
Tabelle 21: Ergebnisse des Shapiro-Wilk-Tests für J ₀ , linke Augen	XIX
Tabelle 22: Ergebnisse des Shapiro-Wilk-Tests für J ₄₅ , linke Augen.....	XX
Tabelle 23: Mauchly-Test auf Sphärizität der SÄ, linke Augen	XXI
Tabelle 24: Tests der Innersubjekteffekte des sphärischen Äquivalents, linke Augen	XXII

Tabelle 25: Paarweise Vergleiche von SÄ aller vier Messungen, linke Augen	XXIII
Tabelle 26: Mauchly-Test auf Sphärizität der J_0 , linke Augen.....	XXIII
Tabelle 27: Tests der Innersubjekteffekte von J_0 , linke Augen	XXIV
Tabelle 28: Paarweise Vergleiche von J_0 aller vier Messungen, linke Augen	XXV
Tabelle 29: Mauchly-Test auf Sphärizität der J_{45} , linke Augen	XXV
Tabelle 30: Tests der Innersubjekteffekte von J_{45} , linke Augen	XXVI
Tabelle 31: Paarweise Vergleiche von J_{45} aller vier Messungen, linke Augen	XXVII

Verwendete Formelzeichen

A	Dioptrischer Abstand
C	Zylinderstärke
J_0	horizontale/vertikale Vektorenkomponente
J_{45}	schräge Vektorenkomponente
S	sphärische Brechkraft
$S\ddot{A}$	sphärisches Äquivalent

1. Einleitung

Fehlsichtigkeiten sind auf dem ganzen Globus weit verbreitet. Weltweit gibt es etwa 2,2 Milliarden Menschen, welche von einer Sehbeeinträchtigung betroffen sind, davon über 80 % im Raum Afrikas (WHO, 2021). Insgesamt leiden etwa 1,4 Milliarden Menschen unter einer Myopie (Holden *et al.*, 2016), wobei der Anteil der betroffenen Erwachsenen weltweit bei 10 – 30 % liegt (Baird *et al.*, 2020). Wie es sich derzeit in China deutlich zeigt, ist zukünftig mit einem starken Anstieg der weltweiten Myopie zu rechnen. Aktuell sind 80 – 90 % aller chinesischen (Schul-) Kinder von einer Kurzsichtigkeit betroffen (Morgan, Ohno-Matsui and Saw, 2012). Prognosen gehen für das Jahr 2050 von bis zu 4,7 Milliarden myopen Menschen aus, was 49,8 % der Weltbevölkerung entspricht (Holden *et al.*, 2016).

Viele dieser Menschen, vor allem in ärmeren Ländern mit einer geringer ausgebauten Infrastruktur, haben kaum Zugang zu einer optischen Korrektur, beispielsweise durch eine Brille. Die Möglichkeit einer mobilen Refraktion ist der erste Schritt um Menschen weltweit durch beispielsweise Hilfsorganisationen/ -aktionen mit einer Sehhilfe ausstatten zu können. Dadurch gewinnen Geräte und Methoden zur mobilen Sehstärkenbestimmung stark an Bedeutung, wie zum Beispiel das Smartphone-gestützte EyeNetra-System (EyeNetra, Inc., Cambridge, MA, USA).

EyeNetra ist ein mobiles System zur vollständigen Refraktion, welches aus drei einzelnen Geräten besteht. Das ‚Netrometer‘ ist ein kleines Scheitelbrechwertmessgerät zur Ermittlung der Glasstärke einer vorliegenden Brille. Zudem wird das Autorefraktometer Namens ‚Netra‘ mitgeliefert, welches an eine VR-Brille erinnert und ein montierbares Smartphone zur Darstellung des Sehtests nutzt. Der ‚Netropter‘, das dritte Gerät im Koffer von EyeNetra, ist ein handgehaltener, leichter Phoropter. Mit diesem lassen sich die Sphäre und der Zylinder an einer Sehzeichentafel ermitteln.

In der vorliegenden Arbeit wird zum einen untersucht, wie präzise eine vollständige Refraktion mit EyeNetra im Vergleich zu einer herkömmlichen Refraktion ist. Letztere besteht dabei aus einer objektiven Messung mit dem DNEye Scanner von Rodenstock und einer subjektiven Messung am Phoropter. Somit wird zuerst betrachtet, wie sich die Messergebnisse zwischen Netra und dem Phoropter unterscheiden. Anschließend werden die Ergebnisse von Netra mit dem Netropter verglichen und zuletzt die Ergebnisse des Netropters mit denen des Phoropters.

Die zweite Fragestellung der Arbeit befasst sich mit der Reproduzierbarkeit der Messergebnisse von EyeNetra bei wiederholten Messungen. Dazu wurden fünf Probanden insgesamt drei Mal mit Netra und dem Netropter gemessen und die Ergebnisse statistisch ausgewertet.

2. Forschungsstand

Geräte zur mobilen (Auto-) Refraktion gewinnen in den letzten Jahren stark an Bedeutung und Interesse im Bereich der Optik und Optometrie. Derzeit gibt es in dem Gebiet jedoch wenig vergleichbare Geräte und Studien. Im folgenden Abschnitt werden eine Studie zur Messgenauigkeit von EyeNetra sowie ein ähnliches Gerät zur mobilen Autorefraktion näher beschrieben.

2.1. „Comparing the Netra smartphone refractor to subjective refraction“

Im Jahr 2019 wurde eine Arbeit mit dem deutschen Titel „Vergleich zwischen dem Netra Smartphone-Refraktor und der subjektiven Refraktion“ von Benoit Tousignant et al. der School of Optometry (Montréal, QC, Canada) publiziert. In der Studie wurden an 36 Probanden zwischen 18 – 35 Jahren, welche keine Vorkenntnisse im Bereich der Optik/ Optometrie hatten, jeweils drei Messungen durchgeführt.

Zu Beginn wurde eine herkömmliche Refraktion durchgeführt, bestehend aus einer objektiven Messung mit einem Skiaskop und einer anschließenden subjektiven Refraktion am Phoropter. Die zweite Messung bestand aus einer Selbstrefraktion der Probanden mit dem mobilen Autorefraktometer Netra. Anschließend bestand die dritte und letzte Refraktion aus einem sphärischen Feinabgleich mit dem Netropter. Dabei wurde auf einen Abgleich der Zylinderachse und -stärke am Netropter verzichtet.

Das Ergebnis der Studie lautet, dass sowohl die Selbstrefraktion als auch die Refraktion mit dem Netropter zu einem geringeren Sehkomfort führten als die herkömmliche Refraktion mit dem Phoropter. Die Ergebnisse von Netra waren im Median 0,6 dpt myoper als die des herkömmlichen Phoropters. Ebenfalls negativer waren die refraktiven Ergebnisse von Netra (Median = $-1,4$ dpt) im Vergleich zu denen des Netropters (Median = $-0,7$ dpt). Die herkömmliche Refraktion mit dem Phoropter (Median = $-0,8$ dpt) wurde als komfortabelstes Sehergebnis gewertet (Tousignant *et al.*, 2020).

2.2. „Zur Reproduzierbarkeit von Refraktionsbestimmungen“

Im Jahr 2014 wurde eine Studie der FH Lübeck und der Fielmann Akademie Schloss Plön veröffentlicht, welche sich mit der Reproduzierbarkeit von Refraktionsbestimmungen befasst. Dabei wurden 20 Probanden „je 2-mal an 2 nicht aufeinanderfolgenden Tagen innerhalb eines Zeitraumes von 2 Wochen von 6 erfahrenen Prüfern (insgesamt 24 Messungen pro Proband)“ (Grein, Schmidt and Ritsche, 2014) refraktiert. Der Ablauf blieb immer gleich: Nach einer objektiven Refraktion am Autorefraktometer wurde ein subjektiver Abgleich mit der Kreuzzylinder-methode durchgeführt.

Die Ergebnisse der Studie zeigen, dass sich „95% der Abweichungen vom mittleren Refraktionsergebnis bei etwa $\pm 0,2$ bis $\pm 0,65$ dpt für das sphärische Äquivalent und die Zylinderstärke“ (Grein, Schmidt and Ritsche, 2014) befinden.

2.3. EyeQue

Im Bereich der schnellen, mobilen Autorefraktion gibt es zum aktuellen Zeitpunkt neben EyeNetra wenig vergleichbare Geräte. Eines von ihnen ist das ‚EyeQue‘-System (EyeQue, Corp., Newark, New Jersey, USA). Dieses ist ein mobiles Autorefraktometer und verwendet für die Messung, ebenso wie EyeNetra, ein Smartphone zum Anzeigen des Sehtests, welches vorne an das Gerät montiert wird. Es wird jedoch nicht wie bei EyeNetra das Smartphone in das Gerät eingesetzt, sondern das Gerät mit Hilfe eines Saugnapfes und eines elastischen Gummibandes auf dem Display des eigenen Smartphones fixiert. Hierzu wird in der zugehörigen App ein Bereich auf dem Display angezeigt, in dem das Gerät angebracht werden soll. Eine Verbindung zwischen dem Gerät und dem Smartphone wird über Bluetooth hergestellt. EyeQue ähnelt äußerlich einem Fernrohr und wird nur vor ein Auge gehalten, um den Sehtest durchzuführen. Das andere Auge fixiert dabei ein Objekt in mindestens zwei Metern Entfernung. Der Sehtest funktioniert genau wie bei dem EyeNetra System. Es müssen ebenfalls mehrmals nacheinander eine grüne und eine rote Linie übereinander gebracht werden, welche sich nach dem Bestätigen wenige Grad dreht. Pro Auge erfolgen drei Messungen, um einen möglichst akkuraten Mittelwert bilden zu können (EyeQue.com, 2022).

Eine Masterarbeit mit dem Titel „Validierung einer neuen Methode zur Messung der objektiven Refraktion mit einem Smartphone-EyeQue Personal Vision Tracker™“ aus

dem Jahr 2019 befasst sich mit der Messgenauigkeit von EyeQue. Dabei werden die Messergebnisse von EyeQue mit denen eines herkömmlichen Autorefraktometers (Grand Seiko WAM5500) verglichen. Die durchschnittliche Abweichung von EyeQue zum Autorefraktometer liegt bei $-0,2$ dpt, wobei keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden können. Jedoch lassen sich die Ergebnisse von EyeQue nicht gut reproduzieren, da hier durchgeführte t-Tests signifikante Unterschiede festgestellt aufweisen.

Zusammenfassend weist EyeQue eine geringe Genauigkeit bei der Messung des Refraktionsfehlers auf. (Pinto, 2019)

3. Material und Methoden

Im folgenden Abschnitt wird der Ablauf der durchgeführten Refraktionen erläutert, und es werden die dafür verwendeten Geräte beschrieben. Für die Durchführung der Studie werden 25 Probanden beidseitig mehrfach refraktioniert. Somit werden insgesamt 50 Augen vermessen, wobei das zu beginnende Auge randomisiert wird.

3.1. Herkömmliche objektive Refraktion am DNEye Scanner

Für die herkömmliche objektive Refraktion wird der DNEye Scanner (Versions-Nr.: 2.0.1806.701) der Firma Rodenstock GmbH verwendet. Dieser ist ein hoch präzises Autorefraktometer, welches die Sehstärken sowohl für das Tag- als auch für das Dämmerungssehen ermittelt. Dabei fokussiert der Proband jeweils für wenige Sekunden auf das Bildchen eines Heißluftballons. Die ermittelten Werte für das Tagsehen werden anschließend gespeichert, notiert und für die folgende subjektive Refraktion verwendet.



Abbildung 1: DNEye Scanner der Rodenstock GmbH

3.2. Stichprobengröße und Ein-/ Ausschlusskriterien

Der Stichprobenumfang für die durchzuführenden ANOVAs wird online mit Hilfe eines Statistikprogrammes berechnet (Hemmerich, 2020). Für das Signifikanzniveau werden, wie für medizinische Forschungen am Menschen bei begrenzten Stichproben üblich, 5 % gewählt. Um bei einer hohen Effektstärke ($\eta^2_p = 0,14$) eine statistische Power von 80 % zu erreichen, wären für die vier Messungen 69 Teilnehmer erforderlich. Da

eine solche Anzahl an Probanden den Rahmen für den angegebenen Zeitraum der Arbeit überschreiten würden, wird in Absprache mit den Betreuern eine Teilnehmerzahl von 25 festgelegt. Durch den reduzierten Stichprobenumfang sinkt jedoch die statistische Power auf etwa 35 %. Für eine genauere statistische Aussagekraft müssen die in dieser Arbeit ermittelten Ergebnisse mithilfe einer Durchführung bei einer höheren Probandenzahl belegt werden.

In die Studie sind alle Studierenden und Mitarbeitenden der Hochschule Aalen mit einem Visus CC $\geq 1,0$ und einer sphärischen Sehstärke im Bereich von -10 dpt bis $+5$ dpt eingeschlossen. Die maximale Zylinderstärke beträgt 6 dpt, da dies die höchstmöglichen sphärischen und zylindrischen Werte sind, die am Netopter eingestellt werden können.

Ausgeschlossen sind Personen mit höheren sphärischen und zylindrischen Werten als oben angegeben sowie Personen mit Sehschärfe beeinträchtigenden Erkrankungen oder Aberrationen höherer Ordnung (HOA), wie sie beispielsweise durch eine LASIK-OP entstehen können.

3.3. Messablauf

Bei jedem Probanden wird zunächst eine objektive Messung mit dem DNEye Scanner durchgeführt. Dabei werden die photopischen Sehstärken notiert und die Topometrie der Hornhaut sowie die HOA betrachtet, um eventuelle Auffälligkeiten zu erkennen, die zu Komplikationen während der Messungen führen könnten.

Mit den am DNEye Scanner ermittelten Werten wird anschließend eine subjektive Refraktion am Phoropter (Modell-Nr.: 11625, American Optical Corporation, NY, USA) durchgeführt. Auf die Bestimmung des BSG folgte die Zylinderachs- und Stärkenbestimmung nach der Zylinder-Nebel-Methode (ZNM) mit abschließendem Rot-Grün-Abgleich. Am Ende der Messung wird jeweils eine monokulare Visusprüfung durchgeführt.

Anschließend wurde eine automatische Messung der Sehstärke durch das mobile Autorefraktometer ‚Netra‘ durchgeführt. Den Probanden wurde die Funktionsweise des Gerätes anschaulich mit Hilfe des interaktiven Tutorials am beigelegten Handy (Samsung Galaxy S4) erklärt, woraufhin die Messungen nach wenigen Minuten beendet waren. Die dabei ermittelten Werte wurden notiert und die Sphäre in den ‚Netropter‘ eingedreht.

Es folgt eine subjektive Refraktion am ‚Netropter‘ nach demselben Schema. Es wird wie bei der Messung am Phoropter mit der BSG-Bestimmung begonnen, darauf folgt die Ermittlung der Zylinderachse und -stärke. Zum Schluss werden ebenfalls ein Rot-Grün-Abgleich und eine monokulare Visusprüfung gemacht.

3.4. Herkömmliche subjektive Refraktion am Phoropter

Die durch den DNEye Scanner ermittelten sphärischen Vorwerte werden zunächst in den Phoropter eingedreht. Verwendet wurde für die Messungen eine Phoroptereinheit mit der Modellnummer 11625 der American Optical Corporation (NY, USA). Während der Messung wurde auf gleichbleibende Lichtbedingungen geachtet, um möglichst vergleichbare Ergebnisse zu erzielen. So wurde für jede Refraktion das Deckenlicht des Raumes eingeschaltet und die Vorhänge zugezogen. Der Refraktionsabstand vom Phoropter bis zum Bildschirm beträgt 5,2 Meter.



Abbildung 2: Herkömmlicher Phoropter der American Optical Corporation

3.5. Automatische Refraktion mit Netra

Die zweite Messung beginnt ebenfalls mit einer objektiven Refraktion am mobilen Autorefraktometer Netra zur Bestimmung von Vorwerten. Dieses ist ein handgehaltenes Gerät aus Kunststoff, in welches die Probanden hineinschauen mussten, während es wie ein Fernglas vor die Augen gehalten wird. Kurz vor der Messung wird ein Smartphone (Samsung Galaxy S4) wie bei einer VR-Brille vorne an das Gerät montiert. Auf dem Smartphone sind mehrere Apps von EyeNetra vorinstalliert, welche die entsprechenden Programme für die Refraktion beinhalten. Die zugehörige App ‚Netra‘



Abbildung 3: Probandin bei einer automatischen Refraktion mit Netra

beinhaltet ein selbsterklärendes Tutorial, in welchem die genaue Funktionsweise des Autorefraktometers kurz und anschaulich erklärt wird.

Die Bedienung erfolgt ausschließlich über die Daumen auf der Oberseite des Geräts. Durch das Drehrad mit dem Kreissymbol auf der rechten Seite wird die PD eingestellt, bis die Testsymbole so gut wie möglich sichtbar sind. Die Testsymbole sind zwei regenschirmähnliche Halbkreise, einer grün und einer rot, welche in Abbildung 4 dargestellt sind.



Abbildung 4: Testmuster von Netra. Die langen Linien des roten und des grünen Schirms müssen übereinander gebracht werden

Die beiden Symbole sind dabei leicht zueinander versetzt. Mit einem Drehrad auf der linken Seite des Gerätes können die beiden Halbkreise jeweils eindimensional verschoben werden, bis die beiden langen Linien der Halbkreise sich exakt überdecken. Anschließend wird die Eingabe mit dem dritten und letzten Knopf auf der rechten Seite des Gerätes bestätigt. Das abgebildete Muster wird automatisch um 20° gedreht und muss erneut zusammengeführt werden.

3.6. Subjektive Refraktion mit dem Netropter

Die durch Netra bestimmten Vorwerte werden anschließend für die subjektive Refraktion mit dem mobilen Phoropter, dem Netropter, verwendet. Dieser wird von den Probanden an den dafür vorgesehenen Haltegriffen vor dem Gesicht festgehalten. An diesem lassen sich über Drehknöpfe sowohl die Sphäre in 0,25 dpt oder in 1 dpt-Schritten als auch der Zylinder in 0,25 dpt-Schritten einstellen. Ebenso lässt sich die Achse der Zylinder stufenlos verändern. Obwohl der Netropter aus leichten Materialien gebaut ist, wird dieser im Laufe der subjektiven Refraktion laut Probandenaussagen schwer. Aus diesem Grund wird vor der getesteten Person ein Tisch positioniert, sodass die Arme ab Refraktionsbeginn aufgestützt werden können. Für die Bestimmung des besten sphärischen Glases (BSG) wird aufgrund der umständlichen Bedienung des mobilen Phoropters eine sphärische Abgleichleiste verwendet. Ergibt die sphärische Glasbestimmung eine Änderung der Gläser im Netropter, werden die Probanden gebeten, die Augen zu schließen, bis die neue sphärische Stärke eingestellt ist. Dies ist notwendig, um den Probanden ein angenehmes Seherlebnis zu bieten. Denn beidseitig wird an den Drehknöpfen im Uhrzeigersinn sowohl in der Sphäre als auch dem Zylinder die Stärke in Richtung Minus verändert, wodurch sich die Bedienung des Netropters zum Phoropter unterscheidet.



Abbildung 5: Netra (Vordergrund) mit zugehörigem Smartphone und dem Netropter (Hintergrund)

3.7. Zylinder-Nebel-Methode

Für die subjektive Refraktion wird die Zylinder-Nebel-Methode (ZNM) verwendet, da eine Skala um die vorgeschalteten Gläser am Netropter fehlt, um einen Kreuzzylinder präzise vorhalten zu können. Hierbei wird zunächst das BSG der Probanden mit einem sphärischen Abgleich bestimmt (Lachenmayr et al., 2016). Ist das BSG ermittelt, wird anhand des erreichten Visus' die Stärke des Zylinders mittels folgender Faustformel geschätzt. Es wird davon ausgegangen, dass sich der Visus pro 0,5 dpt Zylinder um eine Visusstufe verschlechtert. Dabei wird von einem durchschnittlichen Visus von 1,25 ausgegangen (Ohlsson and Villarreal, 2005). Alternativ hilft eine Orientierung an den vorher durch Netra bestimmten Zylinderwerten.

Für die ZNM muss die getestete Person vor dem Zylinderabgleich genebelt werden. Die Stärke der Nebelung ist abhängig von dem zuvor geschätzten Zylinder und wird mit folgender Formel berechnet:

$$\text{Nebelung} = \frac{\text{geschätzter Zylinder}}{2} + 0,5 \text{ dpt} \quad \text{Formel 1}$$

Formel 1 zeigt, dass die Stärke der Nebelung „dem halben geschätzten Zylinder als Plusphäre zuzüglich 0,5 dpt“ entspricht (Lachenmayr et al., 2016).

Die Nebelung wird den Probanden anschließend in den Phoropter eingestellt. Es folgt die Präsentation der unten abgebildeten Strahlenfigur (Abbildung 6) mit der Frage, ob eine der abgebildeten Strichrichtungen kontrastreicher/ dunkler erscheint und um welche es sich dabei handelt. Die darauf genannte Strichrichtung gibt die Achse des geschätzten Zylinders an, woraufhin dieser in den Phoropter eingedreht wird. An diesem Punkt können folgende Fälle eintreten:

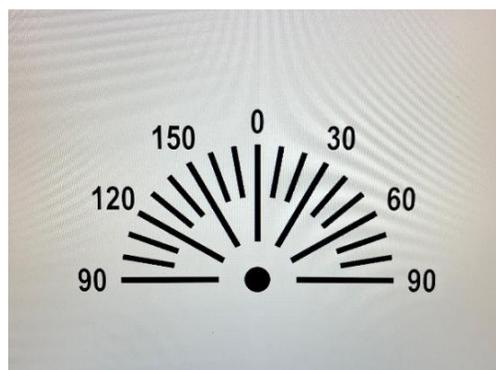


Abbildung 6: abgebildete Strahlenfigur, während der ZNM, die angezeigten Achslagen entsprechen den zu 90° verdrehten Achslagen des Probanden

Beim ersten Fall ist die besser gesehene Strichrichtung auch nach dem Einstellen der geschätzten Zylinderstärke die bessere, was bedeutet, dass der Zylinder noch nicht stark genug ist. Daher wird die Zylinderstärke um $-0,25$ dpt schrittweise weiter erhöht, bis alle Strichrichtungen gleich dunkel sind und keine kontrastreichere Richtung mehr angegeben werden kann. Wenn die besser gesehene Strichrichtung im Vergleich zur zuvor kontrastreicher erkannten Richtung um 90° verdreht ist, also ein Sprung um 90° geschieht, dann ist der Zylinder zu stark und muss schrittweise abgeschwächt werden, bis keine Strichrichtung mehr als dunkler/ kontrastreicher erkannt wird.

Im nächsten Fall wandert die kontrastreichere/ dunklere Strichrichtung um bis zu $\pm 30^\circ$ nach links oder rechts, sobald der geschätzte Zylinder eingedreht oder verstärkt wird. Dies bedeutet, dass die vorher eingestellte Achse nicht exakt stimmt. Daher wird die Achse daraufhin in 5° -Schritten in die Richtung gedreht, in die die kontrastreicher gesehenen Strahlen gewandert sind, bis entweder die erste Strichrichtung wieder die dunklere ist oder keine bessere Strichrichtung mehr zu bestimmen ist.

Im einfachsten und besten Fall wird nach dem Einstellen des geschätzten Zylinders keine der Strichrichtungen mehr als besser erkannt, womit die Stärke und die Achse des Zylinders korrekt sind und keine weiteren Korrekturen notwendig sind (Lachenmayr et al., 2016).

Abschließend wird die Nebelung mit dem Rot-Grün-Test wieder schrittweise rausgedreht und eine Visusprüfung gemacht.

3.8. Power-Vektor-Analyse

Die Power-Vektor-Analyse ist ein Verfahren zur Analyse der Zylinderstärken und Achsfehler, wodurch ein vereinfachter statistischer Vergleich von refraktiven Ergebnissen möglich ist. Diese werden dazu von den sphäro-zylindrischen Werten in die zugehörigen Power-Vektoren umgerechnet. Diese bestehen aus drei verschiedenen Komponenten. Zum einen aus dem sphärischen Äquivalent $S\ddot{A}$, welches die durchschnittliche sphärische Power einer sphäro-zylindrischen Linse beschreibt, sowie eine horizontale (J_0) und schräge Zylinderkomponente (J_{45}), welche die Stärke des gemessenen Zylinders C und die ermittelte Zylinderachse α enthalten. Die beiden Vektorenkomponenten J_0 und J_{45} , entsprechen den horizontalen Achslagen (0° bzw. 90°) sowie den schrägen Achslagen bei 45° bzw. 135° (Thibos and Horner, 2001).

Die drei Komponenten werden mit den nachfolgenden Formeln berechnet:

$$S\ddot{A} = S + \frac{C}{2} \quad \text{Formel 2}$$

$$J_0 = -0,5 * C * \text{COS}(2\alpha) \quad \text{Formel 3}$$

$$J_{45} = -0,5 * C * \text{SIN}(2\alpha) \quad \text{Formel 4}$$

Mit diesen drei Komponenten lässt sich jede Fehlsichtigkeit ohne die Angabe einer Zylinderachse beschreiben. Zudem bietet diese Methode den Vorteil, dass sowohl das sphärische Äquivalent als auch J_0 und J_{45} die Dioptrie (dpt) als Einheit haben und in den Zylinderkomponenten sowohl die Zylinderstärke als auch die Zylinderachse beinhaltet sind (Thibos and Horner, 2001).

Für die Auswertung dieser Arbeit wurden die Ergebnisse aller einzelnen Refraktionen in Power-Vektoren umgerechnet.

3.9. Statistische Auswertung

Die refraktiven Ergebnisse der einzelnen Geräte werden für jeden Probanden inklusive erzielttem Visus in Microsoft Excel notiert. Wie im vorangegangenen Abschnitt beschrieben, werden die Refraktionen in Power-Vektoren umgerechnet, was ebenfalls in Excel mit obenstehenden Formeln Formel 2 bis Formel 4 berechnet wird. Die daraus resultierenden Power-Vektor-Komponenten $S\ddot{A}$, J_0 und J_{45} werden anschließend in das Statistikprogramm SPSS (IBM Deutschland GmbH, Ehningen, Deutschland) überführt, um dort mit der statistischen Auswertung fortzufahren.

Zunächst werden die einzelnen Datensätze der Messungen getrennt nach Power-Vektor-Komponenten, den verschiedenen Messgeräten und der gemessenen Augenseite auf Normalverteilung geprüft. Hierzu werden Histogramme mit darübergelegten Glockenkurven erstellt. Zusätzlich werden in SPSS der Kolmogorov-Smirnov Test sowie der Shapiro-Wilk-Test durchgeführt und in der Ausgabedatei angezeigt. Letzterer wird für die Prüfung auf Normalverteilung der Daten genutzt, da dieser eine größere statistische Power besitzt als der Kolmogorov-Smirnov Test (Razali and Wah, 2011).

Auf die Prüfung auf Normalverteilung folgen mehrere einfaktorielle ANOVAs mit Messwiederholungen ($\alpha = 0,05$) für die drei Power-Vektor-Komponenten $S\ddot{A}$, J_0 und J_{45} , aufgeteilt auf die rechten und die linken Augen. Somit werden insgesamt sechs ANOVAs durchgeführt, doch im Ergebnisteil werden nur die Varianzanalysen der rechten Augen betrachtet, da von einer ähnlichen Datenstreuung zwischen den Augenpaaren der Probanden ausgegangen wird. Die ANOVAs für die linken Augen sind im Anhang zu finden. Da die durchzuführenden Varianzanalysen vier Stufen haben, müssen die Messwerte zuvor auf Sphärizität getestet werden. Die Sphärizität ist eine Annahme, dass die Varianzen der Differenzen der Messpaare gleich sind und wird mit dem Mauchly Test ermittelt (Mauchly, 1940). Wenn keine Sphärizität gegeben ist ($p < 0,05$), dann muss eine von drei Korrekturen auf die Freiheitsgrade angewendet werden. Diese werden ebenfalls von SPSS mit ausgegeben.

Es folgt die Betrachtung der Ergebnisse der Varianzanalysen und gegebenenfalls die Feststellung von Unterschieden zwischen den getesteten Gruppen. Zusätzlich werden von SPSS für jede ANOVA, unabhängig von deren Ergebnis, Bonferroni-Korrigierte t-Tests zwischen allen vier Geräten durchgeführt. Dadurch kann bei einem signifikanten

Ergebnis einer Varianzanalyse die zwei Gruppen, zwischen denen der signifikante Unterschied besteht, lokalisiert werden.

Anschließend werden vier Vergleiche zwischen den Gruppen durchgeführt. Zu Beginn werden die refraktiven Ergebnisse von Netra mit denen des Phoropters verglichen, um einen Eindruck zu erhalten, inwiefern sich Netra allein für eine vollständige Refraktion eignet. Daraufhin folgt ein Vergleich zwischen Netra und dem DNEye Scanner, um die Eignung von Netra für die Bestimmung von Vorwerten zu ermitteln. Als Nächstes werden die Messergebnisse von Netra mit denen des Netropters verglichen, um die Messunterschiede der beiden zusammengehörenden Geräte zu ermitteln. Der letzte Vergleich findet zwischen den Messergebnissen des Netropters und des Phoropters statt, damit die Messgenauigkeit der gesamten Refraktion mit EyeNetra im Gegensatz zu einer kompletten herkömmlichen Refraktion ermittelt werden kann. Für die einzelnen Vergleiche werden jeweils die Differenzen der drei Power-Vektor-Komponenten berechnet und anschließend jeweils ein Mittelwert mit Standardabweichung gebildet. Die Differenzen der Messungen werden in Boxplots dargestellt. Aufgrund der geringen Datenmenge ($n = 25$) wird in dieser Arbeit auf die Erstellung von Bland-Altman-Plots verzichtet.

Für die Auswertung der Wiederholungsmessungen werden jeweils zwischen den drei Messungen pro Auge die Differenzen zwischen allen drei Messungen gebildet, wobei jeweils die größte Differenz pro Power-Vektor-Komponente ($S\ddot{A}$, J_0 und J_{45}) für die weitere Auswertung verwendet wird. Aus den so berechneten Differenzen zwischen den jeweiligen Messungen der fünf Probanden pro Auge werden anschließend die Mittelwerte der Differenzen und die Standardabweichung berechnet, um somit eine Aussage über die Reproduzierbarkeit des sphärischen Äquivalents und der Zylinderkomponenten J_0 und J_{45} von Netra und dem Netropter machen zu können.

Außerdem werden die jeweils größten dioptrischen Abstände A zwischen den wiederholten Refraktionen berechnet und in Boxplots dargestellt. Wie zuvor beschrieben lassen sich Power-Vektoren durch $S\ddot{A}$, J_0 und J_{45} in einem dreidimensionalen darstellen. Mit dem dioptrischen Abstand, welcher die Einheit Dioptrie (dpt) hat, lässt sich die Entfernung zweier in einem Raum dargestellten Punkte beschreiben. Verwendet wird hierzu folgende Formel 5 des „dreidimensionalen Satz des Pythagoras“ (Diepes and Blendowske, 2005):

$$A(P_1, P_2) = |P_1 - P_2| = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2} \quad \text{Formel 5}$$

Dabei entsprechen x , y und z den drei Power-Vektor-Komponenten $S\ddot{A}$, J_0 und J_{45} der miteinander verglichenen Wiederholungsrefraktionen. Es werden zwischen allen drei Wiederholungsrefraktionen die dioptrischen Abstände berechnet und der jeweils größte Wert verwendet.

Zu Beginn der Arbeit wird im Kapitel 2.3 das EyeQue Gerät beschrieben mit einer zugehörigen Studie zur Messgenauigkeit und Reproduzierbarkeit. In der durchgeführten Studie werden t-Tests ($\alpha = 0,05$) zwischen den Wiederholungsmessungen durchgeführt, um auf signifikante Unterschiede zu prüfen (Pinto, 2019). Dasselbe wird für eine bessere Vergleichbarkeit mit EyeNetra durchgeführt. Daher werden zwischen den zwei Wiederholungsmessungen mit dem größten dioptrischen Abstand im sphärischen Äquivalent ein t-Test ($\alpha = 0,05$) durchgeführt.

4. Ergebnisse

Im folgenden Abschnitt werden die Ergebnisse der zuvor beschriebenen Refraktionen und Vergleiche dargestellt. Die 25 gemessenen Probanden sind allesamt Studenten oder Mitarbeiter der HTW Aalen im Studiengang Augenoptik/ Optometrie und zwischen 20 – 60 Jahre alt ($M = 25,9$ Jahre; $SD = 7,9$ Jahre). Die in Power-Vektoren umgerechneten refraktiven Ergebnisse werden zunächst in SPSS auf Normalverteilung überprüft und anschließend insgesamt sechs ANOVAs durchgeführt. Da davon ausgegangen wird, dass sich die Messgenauigkeit nicht zwischen den rechten und den linken Augen unterscheiden, werden im nachfolgenden Ergebnisteil lediglich die Ergebnisse der rechten Augen betrachtet. Im Anhang befinden sich die Ergebnisse für die linken Augen.

Wie zuvor beschrieben werden erst die refraktiven Ergebnisse des mobilen Autorefraktometers Netra mit denen des DNEye Scanners verglichen. Darauf folgt ein Vergleich zwischen Netra und dem herkömmlichen Phoropter und anschließend folgen ein Vergleich zwischen dem Netra-Gerät und dem zugehörigen Netropter sowie ein Vergleich zwischen dem mobilen Netropter und dem herkömmlichen Phoropter.

4.1. Prüfung auf Normalverteilung

Bevor die Varianzanalysen für die Messungen durchgeführt werden können, müssen die gemessenen Daten auf Normalverteilung überprüft werden. Bei der Prüfung auf Normalverteilung werden das sphärische Äquivalent $S\ddot{A}$, J_0 und J_{45} getrennt voneinander betrachtet. Dabei werden zuerst die Histogramme mit zugehörigen Normalverteilungskurven beurteilt und anschließend die Ergebnisse der in SPSS durchgeführten Shapiro-Wilk-Tests betrachtet.

4.1.1. Prüfung auf Normalverteilung: sphärisches Äquivalent

Für die Prüfung auf Normalverteilung der Messdaten werden zunächst die Histogramme zu den einzelnen Geräten betrachtet. In den Abbildung 7 – Abbildung 10 sind die Normalverteilungskurven für den DNEye Scanner, den Phoropter, Netra und den Netropter dargestellt ($n = 25$). Obwohl die Histogramme nicht normalverteilt aussehen, sind dennoch keine starken Auffälligkeiten der Normalverteilungskurven erkennbar.

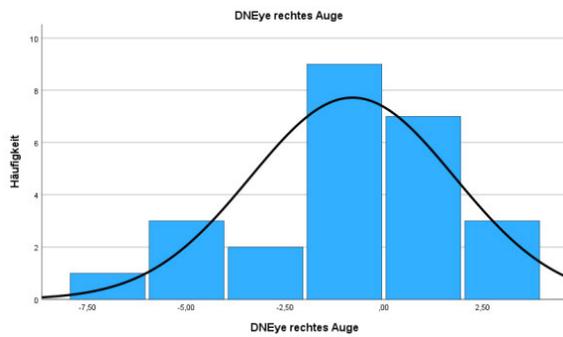


Abbildung 7: Normalverteilungskurve für die sphärischen Äquivalente des DNEye Scanners, rechte Augen

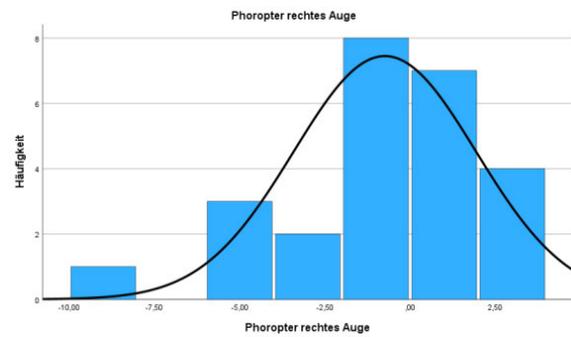


Abbildung 8: Normalverteilungskurve für die sphärischen Äquivalente des Phoropters, rechte Augen

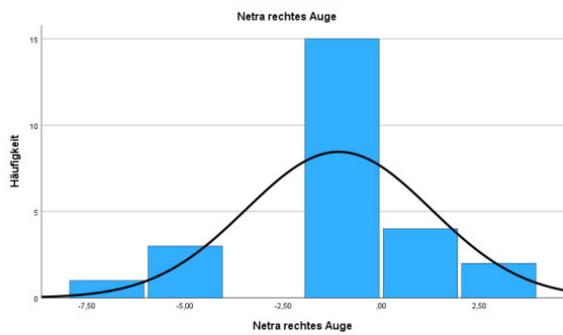


Abbildung 9: Normalverteilungskurve für die sphärischen Äquivalente von Netra, rechte Augen

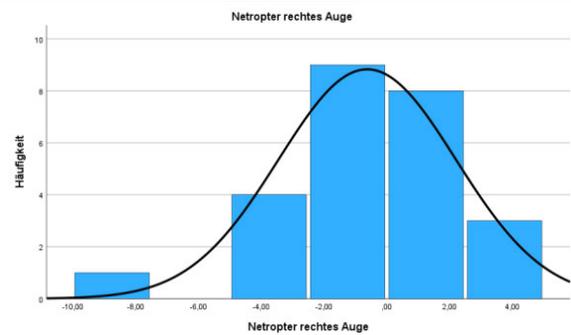


Abbildung 10: Normalverteilungskurve für die sphärischen Äquivalente des Netropters, rechte Augen

In Tabelle 1 sind die Ergebnisse der Tests auf Normalverteilung abgebildet, welche zusätzlich zu den Histogrammen mit den Gauß'schen Glockenkurven in SPSS durchgeführt werden. Betrachtet werden die Ergebnisse des Shapiro-Wilk-Tests ($\alpha = 0,05$). In der zugehörigen Spalte „Signifikanz“ bei eben genanntem Test sind die jeweiligen p-Werte angegeben. Der Shapiro-Wilk-Test wird für alle Messungen der rechten Augen signifikant ($p < 0,05$), wodurch für die Daten nicht von einer Normalverteilung ausgegangen werden kann.

Tabelle 1: Ergebnisse des Shapiro-Wilk-Tests für SÄ, rechte Augen, $n = 25$

	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Statistik	df	Signifikanz	Statistik	df	Signifikanz
DNEye rechtes Auge	,284	25	<,001	,878	25	,006
Phoropter rechtes Auge	,259	25	<,001	,896	25	,015
Netra rechtes Auge	,192	25	,018	,902	25	,021
Netropter rechtes Auge	,224	25	,002	,912	25	,033

a. Signifikanzkorrektur nach Lilliefors

4.1.2. Prüfung auf Normalverteilung: J_0

Nachfolgend sind die Histogramme und Gauß'schen Glockenkurven für die Messungen der Zylinderkomponente J_0 abgebildet. Die Histogramme wirken unregelmäßiger verteilt als die vorangegangenen des sphärischen Äquivalents. Jedoch scheinen die Glockenkurven keine weiteren Auffälligkeiten zu zeigen.

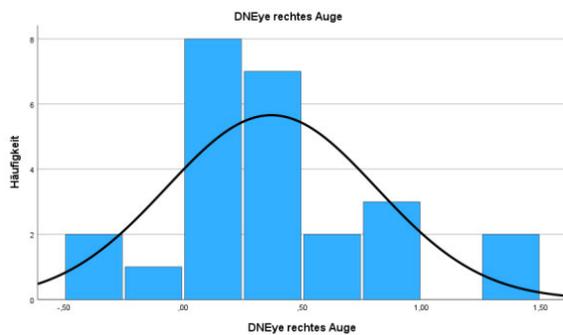


Abbildung 11: Normalverteilungskurve für J_0 des DNEye Scanners, rechte Augen

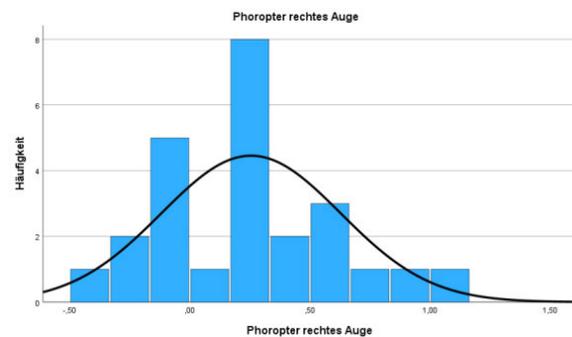


Abbildung 12: Normalverteilungskurve für J_0 des Phoropters, rechte Augen

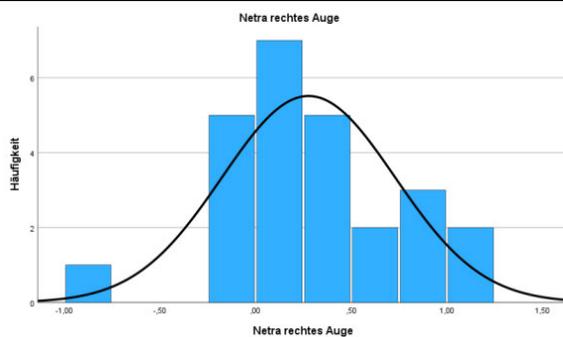


Abbildung 13: Normalverteilungskurve für J_0 von Netra, rechte Augen

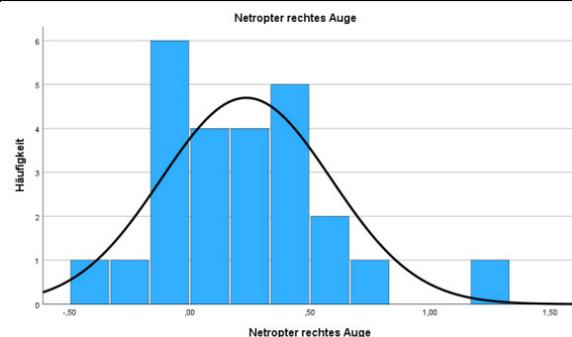


Abbildung 14: Normalverteilungskurve für J_0 des Netropters, rechte Augen

Die in Tabelle 2 abgebildeten Ergebnisse des Shapiro-Wilk-Tests ($\alpha = 0,05$) zeigen für alle vier Messungen keine Signifikanz ($p > 0,05$), wodurch von einer Normalverteilung der Daten ausgegangen werden kann.

Tabelle 2: Ergebnisse des Shapiro-Wilk-Tests für J_0 , rechte Augen, $n = 25$

Tests auf Normalverteilung						
	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Statistik	df	Signifikanz	Statistik	df	Signifikanz
DNEye rechtes Auge	,112	25	,200*	,967	25	,576
Phoropter rechtes Auge	,111	25	,200*	,965	25	,524
Netra rechtes Auge	,090	25	,200*	,972	25	,687
Netropter rechtes Auge	,133	25	,200*	,950	25	,249

*. Dies ist eine untere Grenze der echten Signifikanz.

a. Signifikanzkorrektur nach Lilliefors

4.1.3. Prüfung auf Normalverteilung: J_{45}

Die unten abgebildeten Histogramme stellen die Verteilung der gemessenen Zylinderkomponenten J_{45} der vier Geräte dar. Die zugehörigen Gauß'schen Glockenkurven lassen auf eine Normalverteilung der Daten schließen, da sie keine weiteren Auffälligkeiten zeigen.

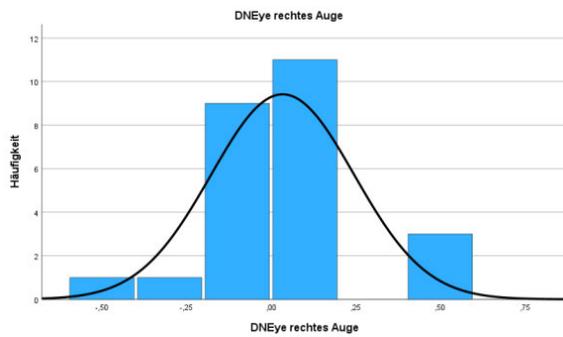


Abbildung 15: Normalverteilungskurve für J_{45} des DNEye Scanners, rechte Augen

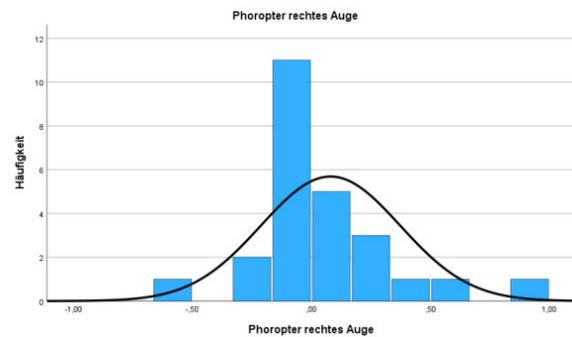


Abbildung 16: Normalverteilungskurve für J_{45} des Phoropters, rechte Augen

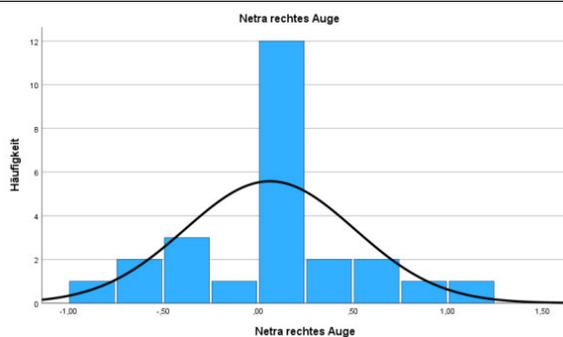


Abbildung 17: Normalverteilungskurve für J_{45} von Netra, rechte Augen

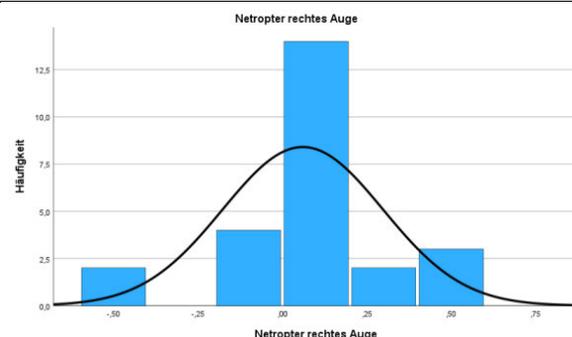


Abbildung 18: Normalverteilungskurve für J_{45} des Netropters, rechte Augen

Die in Tabelle 3 abgebildeten Ergebnisse des Shapiro-Wilk-Tests ($\alpha = 0,05$) zeigt für die Messdaten des Phoropters ein signifikantes Ergebnis ($p < 0,05$), wodurch für diese Messwerte keine Normalverteilung gilt. Im Gegensatz dazu wird für die Messdaten des DNEye Scanners, Netras und des Netropters Normalverteilung angenommen, aufgrund eines nicht-signifikanten Ergebnisses ($p > 0,05$).

Tabelle 3: Ergebnisse des Shapiro-Wilk-Tests für J_{45} , rechte Augen, $n = 25$

	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Statistik	df	Signifikanz	Statistik	df	Signifikanz
DNEye rechtes Auge	,160	25	,099	,937	25	,126
Phoropter rechtes Auge	,232	25	,001	,871	25	,004
Netra rechtes Auge	,164	25	,079	,956	25	,338
Netropter rechtes Auge	,200	25	,011	,922	25	,056

a. Signifikanzkorrektur nach Lilliefors

4.2. ANOVAs: Einfaktorielle Varianzanalysen mit Messwiederholungen

Die einfaktoriellen ANOVAs mit vier abhängigen Variablen ($\alpha = 0,05$) wurden für die rechten und die linken Augen getrennt durchgeführt. In den folgenden Abschnitten werden, wie bei der Prüfung auf Normalverteilung, nur die rechten Augen betrachtet.

4.2.1. ANOVA: sphärische Äquivalente

In Abbildung 19 sind die Mittelwerte und die Standardabweichung für die sphärischen Äquivalente der rechten Augen ($n = 25$) bei den vier verschiedenen Geräten dargestellt. Für den DNEye Scanner ergibt sich ein Mittelwert von $-0,796$ dpt bei einer Standardabweichung von $\pm 2,585$ dpt. Die Messwerte des Phoropters haben einen Mittelwert von $-0,741$ dpt ($SD = 2,679$ dpt). Am negativsten ist der Mittelwert von dem mobilen Autorefraktionssystem Netra mit $-1,086$ dpt und einer Standardabweichung von $\pm 2,36$ dpt. Der Mittelwert für den Netropter liegt bei $-0,625$ dpt ($SD = 2,824$ dpt).

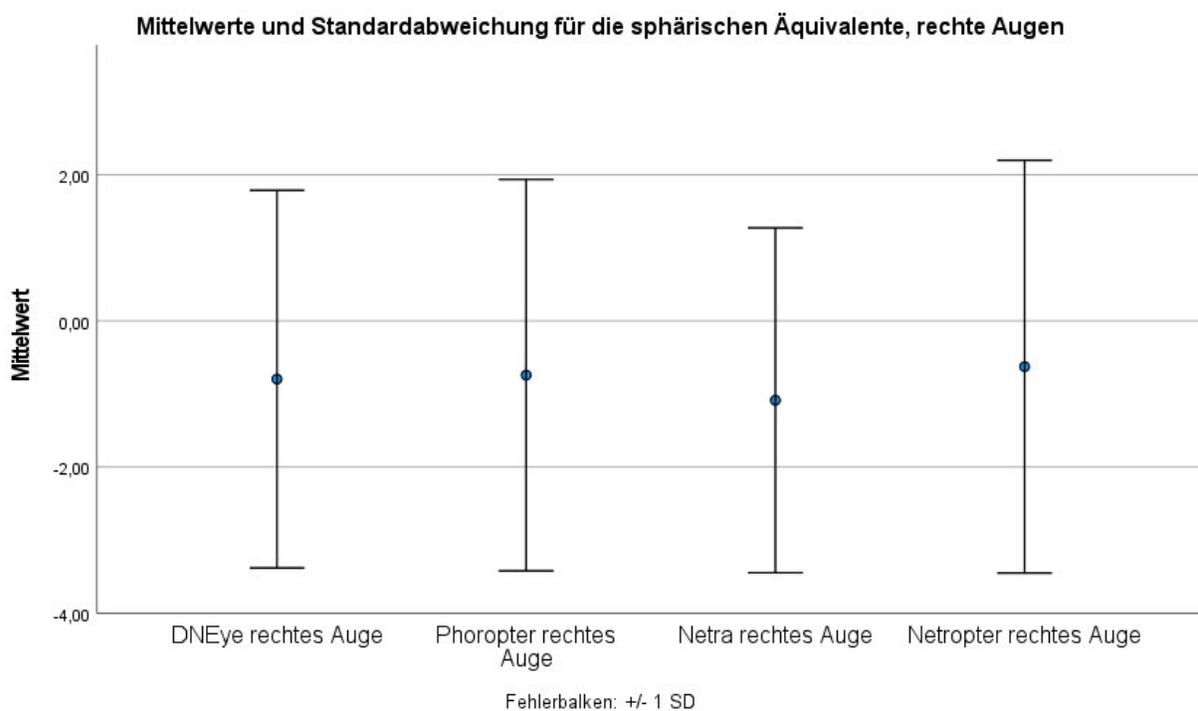


Abbildung 19: Mittelwerte und Standardabweichung des DNEye Scanners, Phoropters, Netra und Netropters für die sphärischen Äquivalente, rechte Augen, $n = 25$

Der in SPSS durchgeführte Mauchly-Test ergibt einen p-Wert von $< 0,001$ an (Tabelle 4). Somit gilt dieser als signifikant und für die weitere Auswertung der ANOVA wird die Greenhouse-Geisser-Korrektur der Freiheitsgrade df verwendet, da nicht von einer Sphärizität der Daten ausgegangen werden kann.

Tabelle 4: Mauchly-Test auf Sphärizität der SÄ, rechte Augen, $n = 25$

Mauchly-Test auf Sphärizität^a

Maß: MASS_1

Innersubjekteffekt	Mauchly-W	Ungefähres Chi-Quadrat	df	Sig.	Greenhouse-Geisser	Epsilon ^b Huynh-Feldt (HF)	Untergrenze
Geräte	,358	23,349	5	<,001	,608	,655	,333

Prüft die Nullhypothese, dass sich die Fehlerkovarianz-Matrix der orthonormalisierten transformierten abhängigen Variablen proportional zur Einheitsmatrix verhält.

a. Design: Konstanter Term
Innersubjekt-design: Geräte

b. Kann zum Korrigieren der Freiheitsgrade für die gemittelten Signifikanztests verwendet werden. In der Tabelle mit den Tests der Effekte innerhalb der Subjekte werden korrigierte Tests angezeigt.

In Tabelle 5 sind die Innersubjekteffekte dargestellt. Da in dem zuvor durchgeführten Mauchly-Test nicht von Sphärizität der Messdaten ausgegangen werden kann, wird die Zeile mit den nach Greenhouse-Geisser korrigierten Daten betrachtet. Aufgrund des in der Spalte „Sig.“ und der Zeile „Greenhouse-Geisser“ angegebenen p-Werts mit $p = 0,014$ ($p < 0,05$), wurde die Nullhypothese der ANOVA abgelehnt und es gilt die Alternativhypothese, dass zwischen mindestens zwei der vier Gruppen ein signifikanter Unterschied besteht.

Tabelle 5: Tests der Innersubjekteffekte des sphärischen Äquivalents, rechte Augen, $n = 25$

Tests der Innersubjekteffekte

Maß: MASS_1

Quelle		Typ III Quadratsumme	df	Mittel der Quadrate	F	Sig.	Partielles Eta-Quadrat
Geräte	Sphärizität angenommen	2,881	3	,960	4,959	,003	,171
	Greenhouse-Geisser	2,881	1,824	1,580	4,959	,014	,171
	Huynh-Feldt (HF)	2,881	1,966	1,466	4,959	,011	,171
	Untergrenze	2,881	1,000	2,881	4,959	,036	,171
Fehler(Geräte)	Sphärizität angenommen	13,945	72	,194			
	Greenhouse-Geisser	13,945	43,766	,319			
	Huynh-Feldt (HF)	13,945	47,174	,296			
	Untergrenze	13,945	24,000	,581			

Für mehr Aufschluss darüber, welche Gruppen sich signifikant unterscheiden, wird die zusätzlich ausgegebene Tabelle 6 der paarweisen Vergleiche betrachtet. In dieser Ta-

belle wird jedes Gerät mit jedem einzeln mittels t-Tests mit Bonferroni-Korrektur verglichen. Im Gegensatz zum signifikanten Ergebnis der ANOVA aus Tabelle 5 zeigt sich bei den paarweisen Vergleichen zwischen keinem der Geräte ein signifikanter Unterschied, obwohl es einen geben sollte. Der Vergleich zwischen den Geräten 3 (Netra) und 4 (Netropter) ergibt ein $p = 0,052$, wodurch auch dieser Vergleich nicht signifikant ist.

Tabelle 6: Paarweise Vergleiche der sphärischen Äquivalente aller vier Messungen, rechte Augen, $n = 25$
1: DNEye Scanner, 2: Phoropter, 3: Netra, 4: Netropter

Paarweise Vergleiche

Maß: MASS_1

(I) Geräte	(J) Geräte	Mittelwertdifferenz (I-J)	Std.-Fehler	Sig. ^a	95% Konfidenzintervall für Differenz ^a	
					Untergrenze	Obergrenze
1	2	-,054	,077	1,000	-,275	,166
	3	,290	,134	,246	-,096	,677
	4	-,170	,099	,586	-,455	,114
2	1	,054	,077	1,000	-,166	,275
	3	,345	,162	,263	-,121	,811
	4	-,116	,083	1,000	-,355	,123
3	1	-,290	,134	,246	-,677	,096
	2	-,345	,162	,263	-,811	,121
	4	-,461	,161	,052	-,925	,003
4	1	,170	,099	,586	-,114	,455
	2	,116	,083	1,000	-,123	,355
	3	,461	,161	,052	-,003	,925

Basiert auf geschätzten Randmitteln

a. Anpassung für Mehrfachvergleiche: Bonferroni.

4.2.2. ANOVA: J_0

In Abbildung 20 sind die Mittelwerte und die Standardabweichung von J_0 der rechten Augen für alle vier Geräte dargestellt. Den höchsten Mittelwert hat der DNEye Scanner mit 0,367 dpt (SD = 0,441 dpt). Der Phoropter hat für J_0 einen Mittelwert von 0,255 dpt (SD = 0,373 dpt). Netra hat einen Mittelwert von 0,277 dpt (SD = 0,452 dpt) und den geringsten Mittelwert hat der Netropter mit 0,235 dpt und einer Standardabweichung von $\pm 0,354$ dpt.

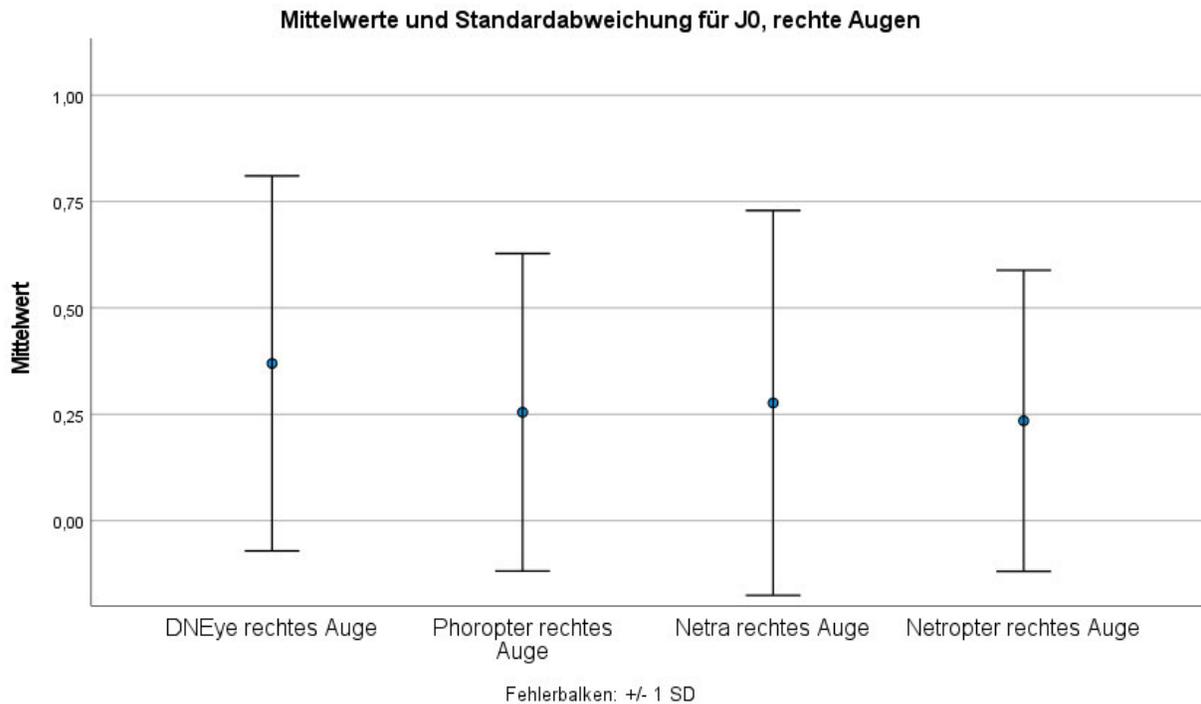


Abbildung 20: Mittelwerte und Standardabweichung des DNEye Scanners, Phoropters, Netra und Netropters für J0, rechte Augen, n = 25

Der anschließende Mauchly-Test ergibt ein $p < 0,001$, weshalb für diese ANOVA ebenfalls die Greenhouse-Geisser-Korrektur verwendet wird.

Tabelle 7: Mauchly-Test auf Sphärizität von J0, rechte Augen, n = 25

Mauchly-Test auf Sphärizität^a

Maß: MASS_1

Innersubjekteffekt	Mauchly-W	Ungefähres Chi-Quadrat	df	Sig.	Greenhouse-Geisser	Epsilon ^b Huynh-Feldt (HF)	Untergrenze
Geräte	,306	26,890	5	<,001	,582	,623	,333

Prüft die Nullhypothese, dass sich die Fehlerkovarianz-Matrix der orthonormalisierten transformierten abhängigen Variablen proportional zur Einheitsmatrix verhält.

- a. Design: Konstanter Term
Innersubjekt-design: Geräte
- b. Kann zum Korrigieren der Freiheitsgrade für die gemittelten Signifikanztests verwendet werden. In der Tabelle mit den Tests der Effekte innerhalb der Subjekte werden korrigierte Tests angezeigt.

Die ANOVA zu J0 der Messungen der rechten Augen zeigt in Tabelle 8, dass zwischen den vier Gruppen kein signifikanter Unterschied vorliegt ($p = 0,158$).

Tabelle 8: Tests der Innersubjekteffekte für J_0 , rechte Augen, $n = 25$

Tests der Innersubjekteffekte							
Maß: MASS_1							
Quelle		Typ III Quadratsumme	df	Mittel der Quadrate	F	Sig.	Partielles Eta- Quadrat
Geräte	Sphärizität angenommen	,266	3	,089	1,966	,127	,076
	Greenhouse-Geisser	,266	1,745	,153	1,966	,158	,076
	Huynh-Feldt (HF)	,266	1,870	,142	1,966	,154	,076
	Untergrenze	,266	1,000	,266	1,966	,174	,076
Fehler(Geräte)	Sphärizität angenommen	3,251	72	,045			
	Greenhouse-Geisser	3,251	41,881	,078			
	Huynh-Feldt (HF)	3,251	44,890	,072			
	Untergrenze	3,251	24,000	,135			

Im Gegensatz zum oben beschriebenen Ergebnis der ANOVA, dass keine signifikanten Unterschiede zwischen den vier Gruppen vorliegen, gibt es bei den paarweisen Vergleichen einen signifikanten Unterschied zwischen der ersten (DNEye Scanner) und der zweiten Gruppe (Phoropter) mit $p = 0,007$. Zwischen der ersten Gruppe (DNEye Scanner) und der vierten Gruppe (Netropter) gibt es mit einem $p = 0,034$ ebenfalls einen signifikanten Unterschied.

Tabelle 9: Paarweise Vergleiche von J_0 aller vier Messungen, rechte Augen, $n = 25$
1: DNEye Scanner, 2: Phoropter, 3: Netra, 4: Netropter

Paarweise Vergleiche						
Maß: MASS_1						
(I) Geräte	(J) Geräte	Mittelwertdifferenz (I-J)	Std.-Fehler	Sig. ^b	95% Konfidenzintervall für Differenz ^b	
					Untergrenze	Obergrenze
1	2	,115 [*]	,031	,007	,025	,204
	3	,093	,073	1,000	-,118	,303
	4	,135 [*]	,044	,034	,007	,262
2	1	-,115 [*]	,031	,007	-,204	-,025
	3	-,022	,076	1,000	-,240	,196
	4	,020	,039	1,000	-,092	,132
3	1	-,093	,073	1,000	-,303	,118
	2	,022	,076	1,000	-,196	,240
	4	,042	,078	1,000	-,182	,266
4	1	-,135 [*]	,044	,034	-,262	-,007
	2	-,020	,039	1,000	-,132	,092
	3	-,042	,078	1,000	-,266	,182

Basiert auf geschätzten Randmitteln

*. Die Mittelwertdifferenz ist in Stufe ,05 signifikant.

b. Anpassung für Mehrfachvergleiche: Bonferroni.

4.2.3. ANOVA: J₄₅

Zuletzt wird eine ANOVA für die dritte Power-Vektor-Komponente J₄₅ durchgeführt. Bei einer Betrachtung der Mittelwerte zeigt sich in Abbildung 21, dass der DNEye Scanner den geringsten Mittelwert mit 0,034 dpt (SD = 0,212 dpt) hat. Im Gegensatz dazu hat der Phoropter den höchsten Mittelwert mit 0,08 dpt (SD = 0,292 dpt). Dazwischen liegen Netra (M = 0,062 dpt; SD = 0,447 dpt) und der Netropter (M = 0,060 dpt; SD = 0,237 dpt), welche nur geringe Unterschiede aufwiesen.

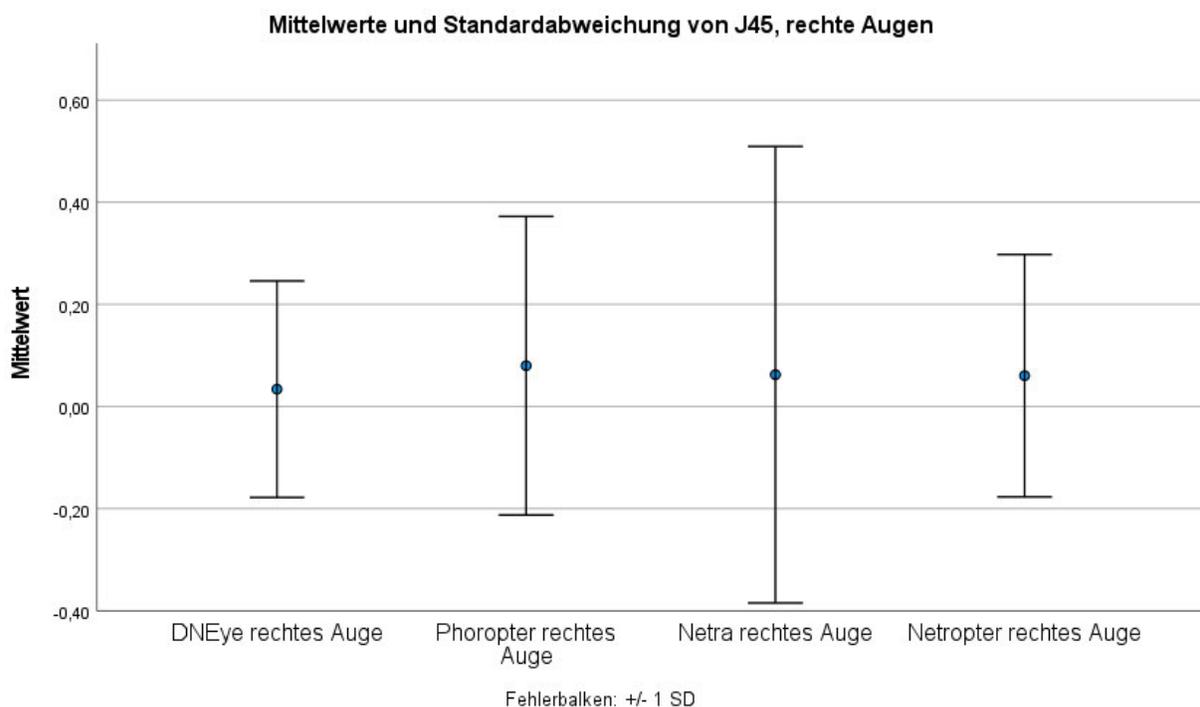


Abbildung 21: Mittelwerte und Standardabweichung des DNEye Scanners, Phoropters, Netra und Netropters für J₄₅, rechte Augen, n = 25

Auch bei dieser ANOVA zeigt sich beim Mauchly-Test (Tabelle 10) keine Sphärizität der gemessenen Daten, weshalb die Greenhouse-Geisser-Korrektur verwendet wird (p < 0,001).

Tabelle 10: Mauchly-Test auf Sphärizität von J_{45} , rechte Augen, $n = 25$

Mauchly-Test auf Sphärizität^a

Maß: MASS_1

Innersubjekteffekt	Mauchly-W	Ungefähres Chi-Quadrat	df	Sig.	Greenhouse-Geisser	Epsilon ^b Huynh-Feldt (HF)	Untergrenze
Geräte	,202	36,398	5	<,001	,521	,550	,333

Prüft die Nullhypothese, dass sich die Fehlerkovarianz-Matrix der orthonormalisierten transformierten abhängigen Variablen proportional zur Einheitsmatrix verhält.

a. Design: Konstanter Term
Innersubjekt-design: Geräte

b. Kann zum Korrigieren der Freiheitsgrade für die gemittelten Signifikanztests verwendet werden. In der Tabelle mit den Tests der Effekte innerhalb der Subjekte werden korrigierte Tests angezeigt.

Die in Tabelle 11 durchgeführte ANOVA zeigt keine Signifikanz zwischen den Gruppen mit $p = 0,779$. Somit unterscheiden sich die Gruppen nicht signifikant voneinander.

Tabelle 11: Tests der Innersubjekteffekte für J_{45} , rechte Augen, $n = 25$

Tests der Innersubjekteffekte

Maß: MASS_1

Quelle		Typ III Quadratsumme	df	Mittel der Quadrate	F	Sig.	Partielles Eta- Quadrat
Geräte	Sphärizität angenommen	,027	3	,009	,184	,907	,008
	Greenhouse-Geisser	,027	1,562	,017	,184	,779	,008
	Huynh-Feldt (HF)	,027	1,651	,016	,184	,791	,008
	Untergrenze	,027	1,000	,027	,184	,672	,008
Fehler(Geräte)	Sphärizität angenommen	3,519	72	,049			
	Greenhouse-Geisser	3,519	37,480	,094			
	Huynh-Feldt (HF)	3,519	39,620	,089			
	Untergrenze	3,519	24,000	,147			

Das soeben beschriebene Ergebnis der Varianzanalyse bestätigte sich mit den paarweisen Vergleichen, da zwischen keiner der vier Gruppen ein signifikanter Unterschied zu erkennen ist. Somit gilt für jede Gruppe in Tabelle 12 $p > 0,05$.

Tabelle 12: Paarweise Vergleiche von J_{45} aller vier Messungen, rechte Augen, $n = 25$
 1: DNEye Scanner, 2: Phorofter, 3: Netra, 4: Netrofter

Paarweise Vergleiche

Maß: MASS_1

(I) Geräte	(J) Geräte	Mittelwertdifferenz (I-J)	Std.-Fehler	Sig. ^a	95% Konfidenzintervall für Differenz ^a	
					Untergrenze	Obergrenze
1	2	-,046	,029	,767	-,130	,038
	3	-,028	,081	1,000	-,260	,203
	4	-,026	,036	1,000	-,129	,076
2	1	,046	,029	,767	-,038	,130
	3	,018	,075	1,000	-,199	,234
	4	,020	,043	1,000	-,105	,144
3	1	,028	,081	1,000	-,203	,260
	2	-,018	,075	1,000	-,234	,199
	4	,002	,085	1,000	-,243	,247
4	1	,026	,036	1,000	-,076	,129
	2	-,020	,043	1,000	-,144	,105
	3	-,002	,085	1,000	-,247	,243

Basiert auf geschätzten Randmitteln

a. Anpassung für Mehrfachvergleiche: Bonferroni.

4.3. Mittelwerte der Differenzen im Vergleich zwischen den Geräten

Zusätzlich zu den Varianzanalysen werden Differenzen zwischen den Geräten im sphärischen Äquivalent $S\ddot{A}$, J_0 und J_{45} errechnet, um ergänzend einen Eindruck darüber zu erhalten, wie sich die Messergebnisse voneinander unterscheiden. Zuerst werden Netra und der Phorofter verglichen, anschließend Netra mit dem DNEye Scanner und mit dem Netrofter. Der letzte Vergleich findet zwischen dem Netrofter und dem Phorofter statt.

Der Vergleich zwischen Netra und dem Phorofter ergibt im sphärischen Äquivalent eine mittlere Differenz von $-0,35$ dpt (SD = $0,81$ dpt). Für die Zylinderkomponente J_0 ergibt sich eine mittlere Differenz von $0,02$ dpt (SD = $0,38$ dpt). Ebenfalls gering sind die durchschnittlichen Differenzen der schrägen Zylinderkomponente J_{45} zwischen Netra und dem herkömmlichen Phorofter mit $-0,02$ dpt (SD = $0,38$ dpt). In Abbildung 22 ist zu erkennen, dass die Streuung der Differenzen im sphärischen Äquivalent größer sind als die Streuungen der beiden Zylinder-Komponenten.

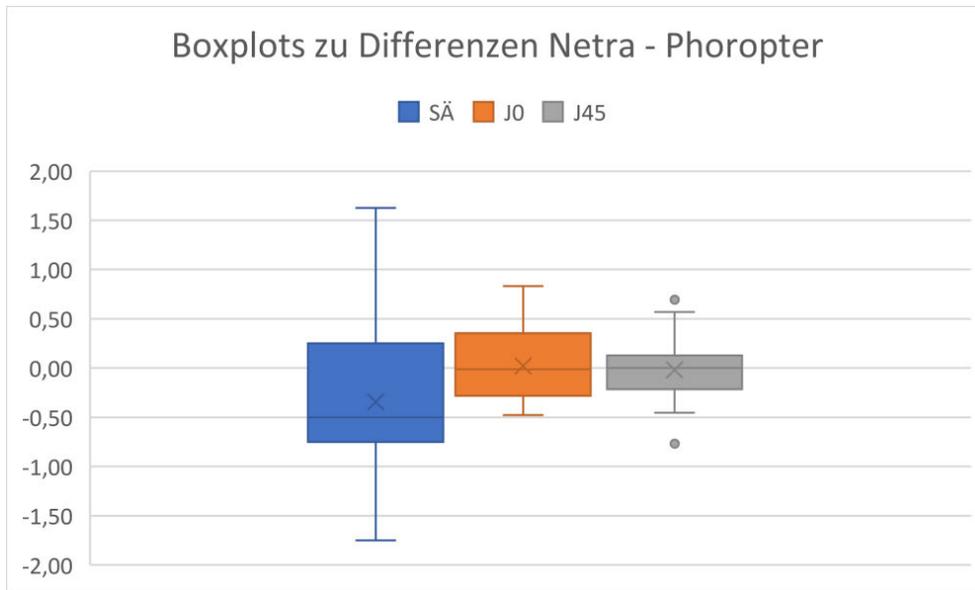


Abbildung 22: Boxplots zu den Differenzen Netra – Phoropter im sphärischen Äquivalent SÄ, J₀ und J₄₅, n = 25

Als nächstes werden die Differenzen in den drei Power-Vektor-Komponenten zwischen Netra und dem DNEye Scanner berechnet. Für das sphärische Äquivalent ergibt sich im Mittel eine Differenz von $-0,29$ dpt (SD = $0,67$ dpt). Für J₀ ergibt sich eine Differenz von $-0,09$ dpt $\pm 0,37$ dpt und für J₄₅ bei $0,03$ dpt mit einer Standardabweichung von $\pm 0,40$ dpt. Die Boxplots in Abbildung 23 zeigen, dass die Differenzen zwischen dem sphärischen Äquivalent und J₀ ähnlich groß streuen. Beim sphärischen Äquivalent gibt es zudem einen Ausreißer bei einer Differenz von $1,31$ dpt.

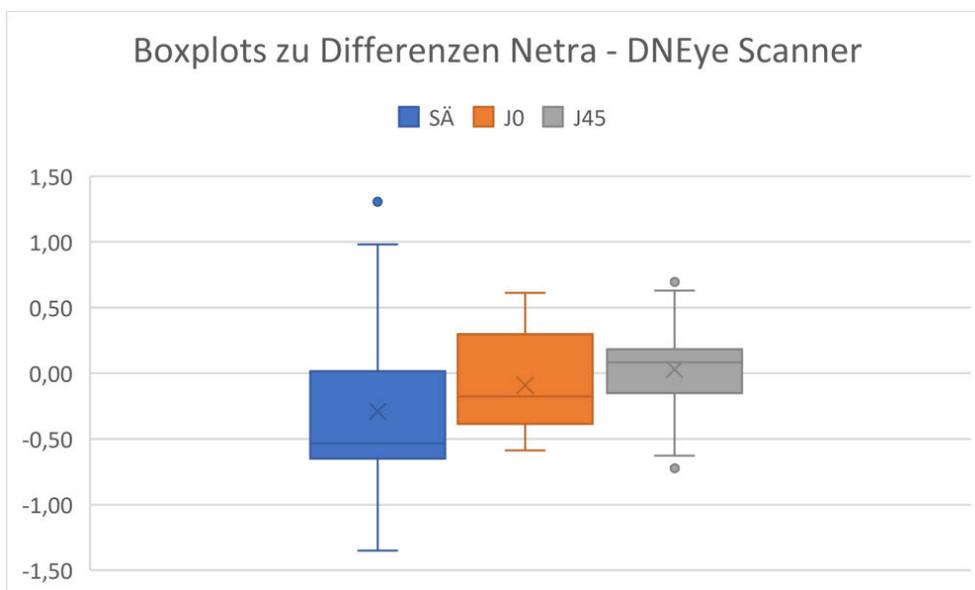


Abbildung 23: Boxplots zu den Differenzen Netra – DNEye Scanner im sphärischen Äquivalent, J₀ und J₄₅, n = 25

Beim Vergleich zwischen Netra und dem Netropter ergibt sich beim sphärischen Äquivalent eine mittlere Differenz von $-0,46$ dpt (SD = $0,81$ dpt). Für J_0 liegt diese bei $-0,04$ dpt mit einer Standardabweichung SD = $0,39$ dpt. Bei J_{45} ergibt sich eine mittlere Differenz von 0 dpt (SD = $0,43$ dpt). Die in Abbildung 24 abgebildeten Boxplots weisen sowohl im sphärischen Äquivalent als auch bei J_0 Ausreißer auf.

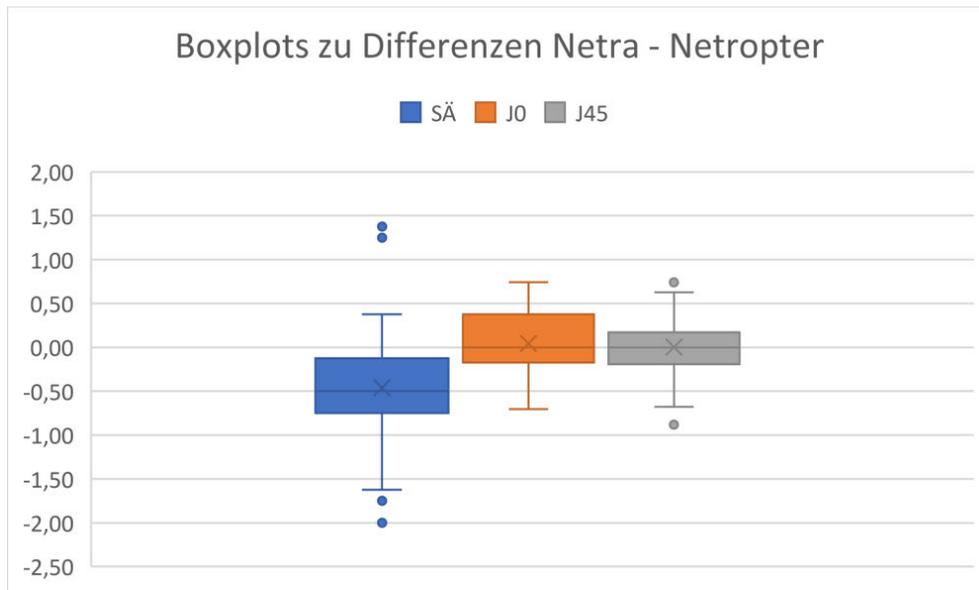


Abbildung 24: Boxplots zu den Differenzen Netra – Netropter im sphärischen Äquivalent, J_0 und J_{45} , $n = 25$

Beim vierten und letzten Vergleich zwischen dem Netropter und dem herkömmlichen Phoropter ergibt sich beim sphärischen Äquivalent eine mittlere Differenz von $+0,12$ dpt bei einer Standardabweichung von $\pm 0,41$ dpt. Für J_0 liegt der Mittelwert der Differenz bei $-0,02$ dpt (SD = $0,19$ dpt) und für J_{45} bei $-0,02$ dpt $\pm 0,22$ dpt. Die Boxplots in Abbildung 25 weisen für SÄ eine größere Streuung auf als für die beiden Zylinder-Komponenten. In den Daten von J_{45} befinden sich zudem drei Ausreißer.

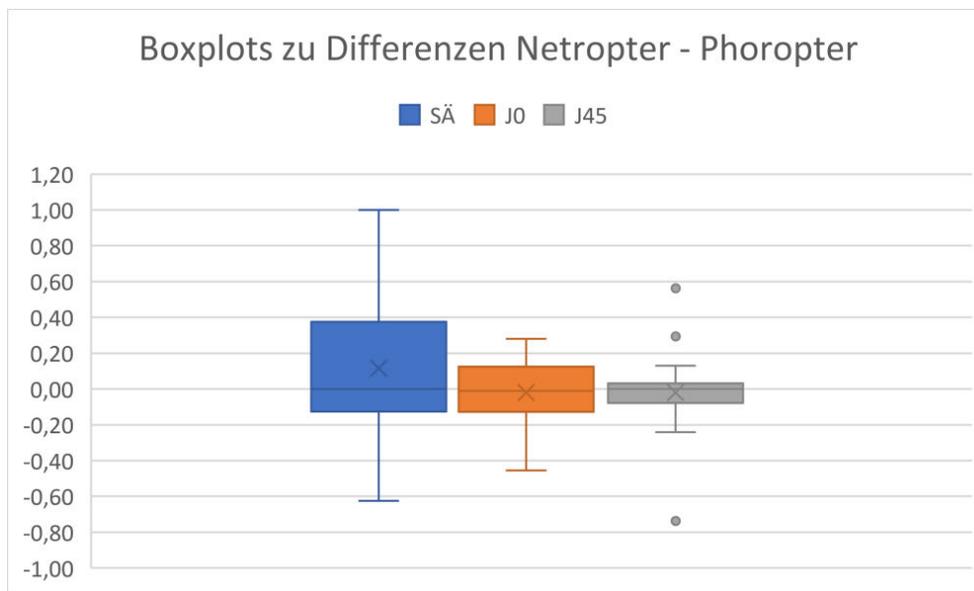


Abbildung 25: Boxplots zu den Differenzen Netropter – Phoroapter im sphärischen Äquivalent, J_0 und J_{45} , $n = 25$

4.4. Ergebnisse der Wiederholungsmessungen

Für die Wiederholungsmessungen werden für die Auswertung die rechten und die linken Augen zusammengenommen ($n = 10$), da von einer gleichen Schwankung Netras und des Netropters ausgegangen wird.

In Abbildung 26 sind drei Boxplots zu den Differenzen in den Power-Vektor-Komponenten SÄ, J_0 und J_{45} der Wiederholungsmessungen abgebildet. Für Netra ergibt der Mittelwert der Differenzen im sphärischen Äquivalent SÄ $-0,39$ dpt ($SD = 0,24$ dpt). Außerdem sind zwei Ausreißer bei $-0,75$ dpt und $-0,88$ dpt zu erkennen. Die mittlere Differenz für J_0 liegt bei $-0,56$ dpt bei einer Standardabweichung von $\pm 0,26$ dpt und für J_{45} bei $-0,67$ dpt ($SD = 0,41$ dpt). Es ist erkennbar, dass die Differenzen im sphärischen Äquivalent deutlich weniger streuten, als für die beiden Zylinderkomponenten.

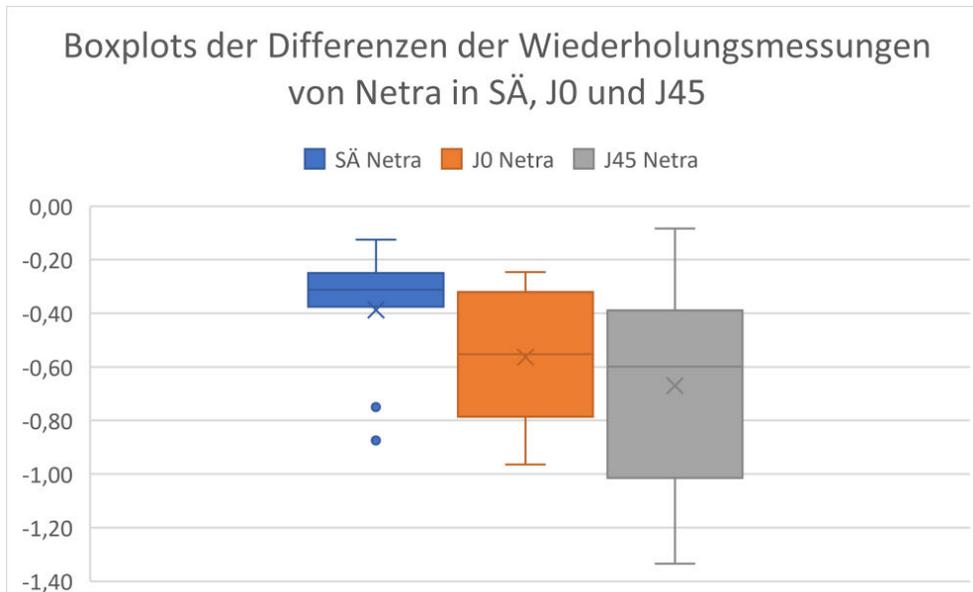


Abbildung 26: Boxplots zu den Differenzen der Wiederholungsmessungen von Netra in SÄ, J₀ und J₄₅, n = 10

Für den Netropter ergibt der Mittelwert zwischen den Differenzen der Messungen – 0,49 dpt (SD = 0,25 dpt). Erkennbar ist ein Ausreißer bei –1,0 dpt. Für die Zylinderkomponente J₀ liegt die durchschnittliche Differenz bei –0,26 dpt und einer Standardabweichung SD = 0,07 dpt mit einem Ausreißer bei –0,13 dpt. Der Mittelwert zwischen den Differenzen für J₄₅ ergibt –0,12 dpt (SD = 0,08 dpt). Beim Netropter zeigt sich in Abbildung 27 eine größere Streuung in den Differenzen der sphärischen Äquivalente als bei J₀ oder J₄₅.

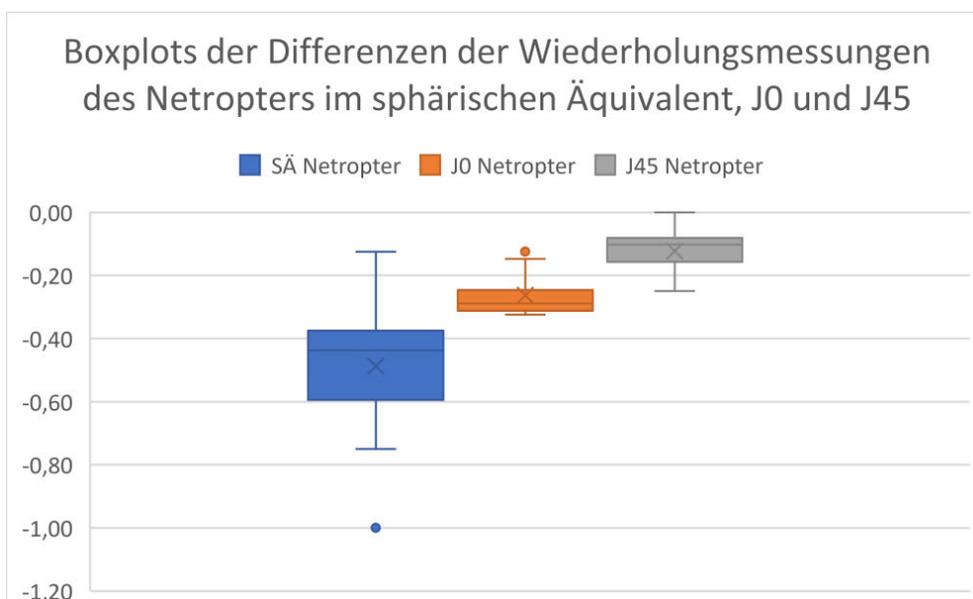


Abbildung 27: Boxplots zu den Differenzen der Wiederholungsmessungen des Netropters in SÄ, J₀ und J₄₅, n = 10

In Abbildung 28 sind die Boxplots zu den mit Formel 5 berechneten dioptrischen Abständen abgebildet. Es ist zu sehen, dass die berechneten dioptrischen Abstände von Netra im Mittel bei 0,87 dpt (SD = 0,51 dpt) liegen. Beim Netropter ergibt sich ein mittlerer dioptrischer Abstand von 0,55 dpt \pm 0,25 dpt. Eine deutlich größerer Streuungsbereich der Daten von Netra im Vergleich zu denen des Netropters ist in den Boxplots deutlich zu erkennen.

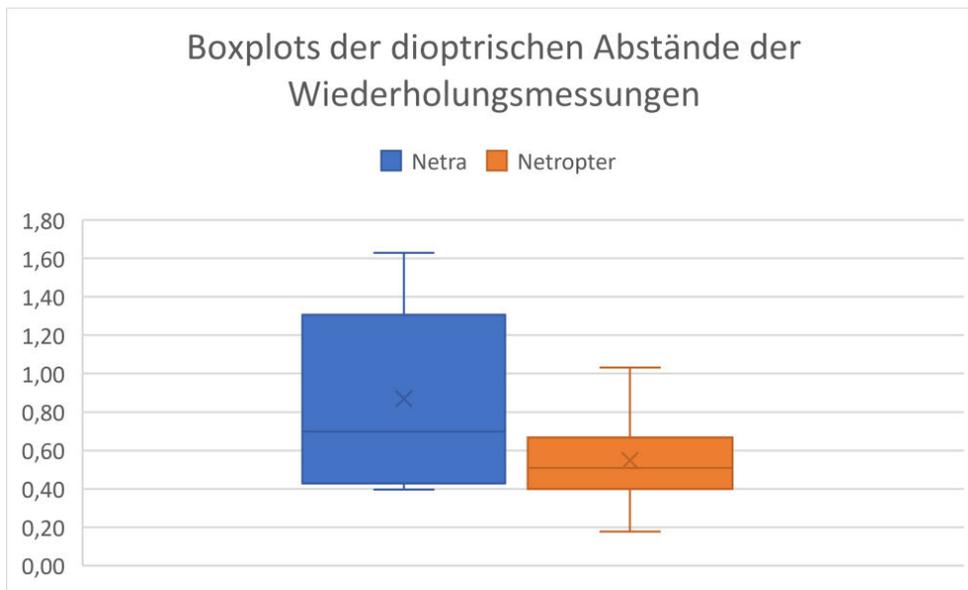


Abbildung 28: Boxplots zu den dioptrischen Abstände der Wiederholungsmessungen von Netra und dem Netropter, $n = 10$

4.5. t-Test der Wiederholungsmessungen von Netra

Zwischen den für die Berechnung der dioptrischen Abstände verwendeten Wiederholungsmessungen in Kapitel 4.4 wurde für den Vergleich von Netra und dem EyeQue-Gerät ein t-Tests durchgeführt. Somit wird die Messgenauigkeit von Netra auf Signifikanz überprüft. Die Ergebnisse des t-Tests sind in Tabelle 13 zu sehen. Es wird ein t-Wert von $t = 0,186$ ausgegeben, bei einem zweiseitigen kritischen t-Wert von $t_{krit} = 0,856$. Somit sind zwischen den Wiederholungsmessungen keine signifikanten Unterschiede vorhanden ($t < t_{krit}$).

Tabelle 13: paarweiser t-Test zwischen den Wiederholungsmessungen von Netra mit den größten dioptrischen Abständen

	<i>1. Messung</i>	<i>2. Messung</i>
Mittelwert	-0,8625	-0,8375
Varianz	12,7446181	14,1078125
Beobachtungen	10	10
Pearson Korrelation	0,99458432	
Hypothetische Differenz der Mittelwerte	0	
Freiheitsgrade (df)	9	
t-Statistik	0,18641093	
P(T<=t) einseitig	0,42812831	
Kritischer t-Wert bei einseitigem t-Test	1,83311293	
P(T<=t) zweiseitig	0,85625661	
Kritischer t-Wert bei zweiseitigem t-Test	2,26215716	

5. Diskussion

Bei der Betrachtung der Ergebnisse ist, wie zuvor erwähnt, zu berücksichtigen, dass die statistische Power für die durchgeführten ANOVAs bei dem für die Arbeit verwendeten Stichprobenumfang von $n = 25$ Probanden bei 35 % liegt. Daher müssen die Ergebnisse mit Vorsicht betrachtet werden. Zudem sind die gemessenen refraktiven Ergebnisse umgerechnet in Power-Vektoren laut dem Shapiro-Wilk-Test in SPSS nicht normalverteilt. Dennoch wurde die ANOVA mit Messwiederholungen für die statistische Auswertung der Vergleiche gewählt, da diese als „robust gegenüber der Verletzung der Normalverteilungsannahme“ gilt (Hemmerich, 2016).

5.1. Netra und DNEye Scanner im Vergleich

Da Netra das Autorefraktometer der EyeNetra-Geräte ist, wird dieses zuerst mit dem DNEye Scanner verglichen. In der Studie von Tousignant et al. (2020) kann Netra allein keinen zufriedenstellenden Sehkomfort erzielen und die statistischen Ergebnisse der Studie decken sich mit den hier gemessenen, ausgewerteten Ergebnissen.

Netra misst in dieser Studie durchschnittlich $-0,29$ dpt myopere Ergebnisse im sphärischen Äquivalent (SD = $0,67$ dpt) im Vergleich zum DNEye Scanner. Zurückzuführen sind die Differenzen möglicherweise auf die Anwendung durch die Probanden und die Testart des Systems. Dennoch eignet sich Netra in diesem Vergleich für die Ermittlung von Vorwerten, um eine Grundlage für eine anschließende subjektive Refraktion zu bilden.

5.2. Netra und Phoropter im Vergleich

Netra kann auch einzeln für 1290 \$ erworben werden. Mit dem folgenden Vergleich wird der Messunterschied von Netra mit einer vollständigen herkömmlichen Refraktion ermittelt, indem das Gerät mit den Messergebnissen des Phoropters verglichen wird. Die mittlere Differenz im sphärischen Äquivalent von $-0,35$ dpt (SD = $0,81$ dpt), Median = $-0,5$ dpt, bestärkt das Ergebnis der Studie von Tousignant et al. (2020), bei der im Median eine Differenz von $-0,6$ dpt gemessen wurde und die Ergebnisse somit myoper waren als beim Phoropter. Die mittleren Differenzen in den Zylinder-Komponenten waren mit $0,02$ dpt (J_0) und $-0,02$ dpt (J_{45}) sehr gering, was für eine gute Messgenauigkeit der Zylinder-Komponenten spricht. Die Boxplots in Abbildung 22 zeigen

ebenfalls, dass Netra im sphärischen Äquivalent myoper misst. Zudem streuen die Differenzen des sphärischen Äquivalents mehr als die der Zylinder-Komponenten J_0 und J_{45} .

Die Differenzen zwischen Netra und dem Phoropter können ein Resultat der Testart mit den roten und grünen Schirm-Symbolen von Netra sein. Zudem wird das System von den Probanden selbst verwendet, sodass eine fehlerfreie Nutzung nicht garantiert werden kann. Daher ist in Anbetracht der Nutzung eine einheitliche und leicht verständliche Erklärung und Demonstration des Gerätes unabdingbar.

5.3. Netra und Netropter im Vergleich

Zusätzlich zu Netra kann auch der Netropter für 950 \$ einzeln gekauft werden. Im direkten Vergleich misst Netra im sphärischen Äquivalent $-0,46$ dpt (SD = 0,81 dpt) negativere, also myopere, Werte, als der Netropter. Für J_0 (M = 0,04 dpt, SD = 0,39 dpt) und J_{45} (M = 0 dpt, SD = 0,43 dpt) unterscheiden sich die Differenzen nur leicht. Auch hier lassen sich die im Durchschnitt myoperen Messwerte von Netra mit der Handhabung durch die Probanden erklären, wie bei den vorherigen Vergleichen bereits erwähnt.

5.4. Netropter und Phoropter im Vergleich

Zuletzt wird die Frage nach der Messgenauigkeit zwischen dem Netropter und dem herkömmlichen Phoropter beantwortet. Die Post-Hoc t-Tests der durchgeführten ANOVAs ergeben kein signifikantes Ergebnis für SÄ ($p = 0,052$). Es ist zu vermuten, dass das Ergebnis dieses Vergleichs durch die strenge Bonferroni-Korrektur nicht signifikant ist, obwohl es dieses eigentlich wäre. Vermutlich zeigt das Ergebnis der ANOVA zu den sphärischen Äquivalenten (Kapitel 4.2.1) daher ein signifikantes Ergebnis. Die mittlere Differenz zeigt, dass der Netropter im sphärischen Äquivalent $+0,12$ dpt (SD = 0,41 dpt) hyperoper, also positiver, misst als der Phoropter. Auch die durchschnittlichen Differenzen von J_0 und J_{45} sind mit $-0,02$ dpt (SD = 0,19 dpt) für J_0 und $0,02$ dpt (SD = 0,22 dpt) für J_{45} sehr gering, obwohl im Netropter leichte Linsen aus Kunststoff verbaut sind. Diese geringen Differenzen deuten auf eine gute Messgenauigkeit des Netropters hin. Jedoch ist zu erwähnen, dass während der Studie die

Messreihenfolge der vier Geräte unverändert bleibt. Es wird immer mit dem DNEye Scanner begonnen, gefolgt vom Phoropter und den anschließenden Refraktionen von Netra und dem Netropter. Somit kann es bei den Probanden zu einem Lerneffekt bei den subjektiven Refraktionen kommen, da sie während der zweiten subjektiven Refraktion mit dem Netropter bereits wissen, was bei der ZNM passiert, wie die Strahlenfigur aussieht und was geantwortet werden muss. Zudem ist bei der Verwendung des Netropters wichtig, dass vor der Refraktion ein Tisch bereitgestellt wird, auf dem die Teilnehmenden ihre Ellenbogen abstützen können, da das Gerät ansonsten, laut Probandenaussagen, in der Zeit der Messung sehr schwer wird. Während der Refraktion darf die Sitzposition nicht verändert werden, da durch das Aufstützen der Ellenbogen der Abstand zwischen den gemessenen Probanden zum Bildschirm einige Zentimeter verringert ist.

Bei der Anwendung des Netropters fällt auf, dass aufgrund der Konstruktion des Gerätes, zwischen manchen Viertel-dpt-Schritten (beispielsweise zwischen 0,75 dpt und 1 dpt) vier Gläser durchgeschaltet werden müssen. Dies kann für die Probanden sehr anstrengend und verwirrend sein, wodurch diese daher gebeten werden müssen, für das Eindrehen einer neuen Stärke kurz die Augen zu schließen. Zudem muss dieser Vorgang Routine für den Prüfer sein, damit ein angenehmes Refraktionserlebnis gewährleistet werden kann.

5.5. Diskussion der Wiederholungsmessungen

Bei den Wiederholungsmessungen zeigt sich für Netra eine geringe Schwankung im sphärischen Äquivalent mit einer durchschnittlichen Differenz von $-0,39$ dpt ($SD = 0,24$ dpt). Jedoch sind die durchschnittlichen Differenzen und Streuungen für die beiden Zylinder-Komponenten deutlich höher. Zu sehen ist dies auch in den zugehörigen Boxplots (Abbildung 26). Bei Betrachtung der Messdaten (Seite XVI, Tabelle 18) lässt sich kein regelmäßiges Muster für die Schwankungen erkennen. Es gibt große Abweichungen sowohl zwischen hohen und mittleren Zylinderwerten, aber auch bei geraden und schrägen Achslagen. Eine mögliche Ursache ist auch hier die Handhabung von Netra durch die Probanden und in diesem Zusammenhang die Erklärung der Funktionsweise des Gerätes durch die prüfende Person. Zudem könnte bezüglich der Reproduzierbarkeit der von Netra verwendete Test mit dem roten und

grünen Testsymbol nicht geeignet sein. Es ist zu erwähnen, dass die mittleren Differenzen von $-0,39$ dpt innerhalb des von Grein et al. (2014) festgelegten Bereichs der Reproduktion liegt ($\pm 0,65$ dpt), in welchem sich Refraktionen unter optimalen Bedingungen reproduzieren lassen.

Bei der Betrachtung der Boxplots zu den Wiederholungsmessungen des Netropters ist eine größere Schwankung im sphärischen Äquivalent sichtbar ($M = -0,49$ dpt, $SD = 0,25$ dpt) als bei J_0 und J_{45} . In den Messdaten fallen bei den Messungen mit großen Unterschieden der Differenzen des sphärischen Äquivalents ($< -0,5$ dpt) vor allem besonders große Abweichungen in den gemessenen sphärischen Werten auf. Dabei handelt es sich sowohl um hohe Myopien (bis zu -8 dpt) sowie hohe Hyperopien (bis zu 5 dpt). Zudem ist auffällig, dass die größten Differenzen in den sphärischen Äquivalenten bei den linken Augen der Probanden entstanden sind. Begründet kann das durch die Fensterfront sein, welche sich immer rechtsseitig der Probanden befindet. Diese ist zwar für jede Messung mit grau-transluzenten Vorhängen abgedunkelt, jedoch kam direktes Sonnenlicht dennoch hindurch. Somit befindet sich rechtsseitig immer mehr Licht als auf der linken Seite. Da die Augen, mit denen die Refraktionen begonnen werden, randomisiert sind, ist hier eine Wechselwirkung mit den Refraktionsergebnissen auszuschließen. Die gemessenen Zylinderwerte sind bei den Wiederholungsmessungen mit dem Netropter jeweils sehr konstant.

Bei der Berechnung des dioptrischen Abstandes für Netra ergibt sich ein mittlerer Abstand A von $0,87$ dpt ($SD = 0,51$ dpt) mit einer größeren Streuung als bei den dioptrischen Abständen des Netropters ($M = 0,65$ dpt, $SD = 0,36$ dpt). Im Zusammenhang mit den zuvor diskutierten Daten der Messwiederholungen lassen sich die größeren dioptrischen Abstände der Messungen mit Netra durch die teilweise starken Zylinderunterschiede erklären, da die sphärischen Äquivalente keine größeren Differenzen aufzeigen. Eine mögliche Erklärung für die Messungenauigkeiten bei den Zylindern kann ebenfalls mit der bei Netra verwendeten Testart erklärt werden, indem sich der Test möglicherweise nicht für eine präzise Zylinderbestimmung eignet.

Der mittlere dioptrische Abstand A der Wiederholungsmessungen des Netropters liegt bei $A = 0,65$ dpt. Die Streuung ist dabei deutlich geringer als die der dioptrischen Abstände von Netra (Abbildung 28).

Auffällig ist, dass beim Vergleich zwischen Netra mit dem Phoropter die mittleren Differenzen der Zylinderkomponenten J_0 ($M = 0,02$ dpt) und J_{45} ($M = -0,02$ dpt) sehr gering waren, aber die Streuung dieser Daten bei den Wiederholungsmessungen von Netra sehr hoch ist (siehe Abbildung 26). Bei Beobachtung der gemessenen Daten fällt auf, dass die Probanden bei den Wiederholungsmessungen überwiegend höhere Zylinder (> -1 dpt) haben. Das spricht ebenfalls für die zuvor erwähnte große Streuung von Netra bei höheren Zylindern.

5.6. Netra und EyeQue im Vergleich

In der oben genannten Studie zur Messgenauigkeit und Reproduzierbarkeit wird das EyeQue System mit dem Grand Seiko WAM5500 verglichen und weicht im sphärischen Äquivalent im Mittel $-0,2$ dpt von denen des Autorefraktometers ab. Es zeigt sich, dass Netra im Vergleich zum DNEye Scanner eine etwas stärkere mittlere Differenz von $-0,29$ dpt hat. In der Studie von Pinto (2019) ergibt der t-Test der Wiederholungsmessung signifikante Unterschiede zwischen den Messwiederholungen und somit keine gute Reproduzierbarkeit der Refraktionen. Im Gegensatz dazu zeigt der in Kapitel 4.5 durchgeführte t-Test der Wiederholungsmessungen von Netra keine Signifikanz, wodurch sich die sphärischen Äquivalente von Netra gut reproduzieren lassen.

Beim Messvorgang gibt es zwischen Netra und EyeQue zwei wesentliche Unterschiede. Zum einen misst Netra die Refraktion beider Augen, ohne dass das Gerät manuell zwischen den Augen neu positioniert werden muss. Da die Hardware von EyeQue an ein Fernrohr erinnert, muss dieses nach der Messung des einen Auges abgenommen und vor dem anderen Auge positioniert werden. Der zweite große Unterschied der Messvorgänge besteht in der Anzahl der Messungen. Für den Netropter ist jeweils ein Messvorgang pro Auge erforderlich, während bei EyeQue pro Auge drei Messungen durchgeführt werden, was zeitaufwendiger ist. Andererseits wird zwischen diesen drei Refraktionen ein Mittelwert gebildet. Somit besteht bei Netra die Möglichkeit, dass gerade bei hohen Zylindern eine einzelne Messung zu Fehlern führt. Diese müssen anschließend mit dem Netropter ausgeglichen werden.

Ein weiterer Unterschied zwischen den Geräten liegt darin, dass EyeQue privat gekauft und genutzt werden kann (99 \$). Per App kann der Kunde anschließend mit den gemessenen Refraktionen in der App eine Brille bestellen und anfertigen lassen

(EyeQue.com, 2022). Zwar ist dieser Vorgang bequem, jedoch fehlt hierbei die professionelle Unterweisung und der subjektive Feinabgleich der gemessenen Werte, um ein komfortables Sehen zu ermöglichen (Sapiens, Ramic and Serri, 2022). Im Gegensatz dazu wird das EyeNetra-System von ausgebildetem Personal fachgerecht erklärt und angewendet, sodass anschließend die optimale Brille für die Kunden ausgesucht werden kann.

6. Schlussfolgerung

Zusammenfassend zeigen die Ergebnisse dieser Studie, dass das mobile Autorefraktometer Netra jeweils myopere Refraktionsergebnisse misst als der DNEye Scanner, der Phoropter und der Netropter. Dies bedeutet, dass sich Netra zwar für eine schnelle und einfache Refraktion eignet, jedoch nur zur Bestimmung von Vorwerten, um eine anschließende subjektive Refraktion durchführen zu können. Zudem zeigten sich bei den Messwiederholungen mit Netra starke Schwankungen der Zylinderwerte, besonders in Zusammenhang mit stärkeren Zylindern, wie in Kapitel 5.5 beschrieben.

In Kombination mit dem Netropter zeigen sich nur sehr geringe Differenzen zwischen den Refraktionsergebnissen von EyeNetra im Vergleich zu denen einer herkömmlichen Refraktion am Phoropter. Daher eignet sich das mobile Refraktionssystem gut, um weltweit Menschen mit einer Sehhilfe versorgen zu können, sofern für die Messung ideale Umgebungsbedingungen geschaffen werden können, wie zum Beispiel annähernd gleichbleibende Lichtbedingungen, ein gleichbleibender Mindestabstand zur Refraktion sowie eine verständliche und geübte Kommunikation zwischen dem Prüfer und der gemessenen Person.

Eine geeignete Sehzeichentafel für die subjektive Refraktion muss jedoch zusätzlich erworben werden, da diese nicht in dem Koffer bestehend aus Netra, dem Netrometer (Scheitelbrechwertmessgerät) und dem Netropter enthalten ist. Zudem eignet sich der Netropter nicht für eine Refraktion mit der Kreuzzylinder-Methode aufgrund einer fehlenden Achsskala im Bereich der Linsen der gemessenen Personen. Daher ist es notwendig, die Zylinder-Nebel-Methode zu beherrschen, welche heutzutage jedoch nur noch selten unterrichtet wird.

Mit Blick auf zukünftige Forschungen ist eine größer angelegte Studie mit mehr Probanden zu empfehlen, um eine höhere statistische Aussagekraft zu erhalten. Hierbei würde sich für eine statistische Power von 80 % eine Stichprobengröße von $n = 69$ Probanden empfehlen. In dieser Arbeit bietet sich zudem eine Auswertung zusätzlich mit Bland-Altman-Plots an, um Aussagen über Zusammenhänge zwischen den Differenzen mit der Höhe der Mittelwerte der sphärischen Äquivalente machen zu können.

Zudem empfiehlt sich eine Studie zur Änderung der Messgenauigkeit eines modifizierten Netropters, bei dem eine zusätzliche Achsskala um die Durchblickspunkte herum

aufgetragen wurde. So wird den refraktionierenden Personen die Anwendung der Kreuzzylinder-Methode für die Bestimmung des Zylinders der Probanden ermöglicht.

Literatur

Baird, P.N. *et al.* (2020) 'Myopia', *Nature Reviews. Disease Primers*, 6(1), p. 99. Available at: <https://doi.org/10.1038/s41572-020-00231-4>.

Diepes and Blendowske (2005) *Optik und Technik der Brille*. 2. Auflage. Optische Fachveröffentlichung GmbH.

Grein, H.-J., Schmidt, O. and Ritsche, A. (2014) 'Zur Reproduzierbarkeit von Refraktionsbestimmungen', *Der Ophthalmologe*, 111(11), pp. 1057–1064. Available at: <https://doi.org/10.1007/s00347-014-3064-6>.

Holden, B.A. *et al.* (2016) 'Global Prevalence of Myopia and High Myopia and Temporal Trends from 2000 through 2050', *Ophthalmology*, 123(5), pp. 1036–1042. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ophtha.2016.01.006>.

Lachenmayr, Friedburg, and Buser (2016) *Auge - Brille - Refraktion*. 5. Auflage. Thieme Verlag.

Mauchly, J.W. (1940) 'Significance Test for Sphericity of a Normal n-Variate Distribution', *The Annals of Mathematical Statistics*, 11(2), pp. 204–209.

Morgan, I.G., Ohno-Matsui, K. and Saw, S.-M. (2012) 'Myopia', *Lancet (London, England)*, 379(9827), pp. 1739–1748. Available at: [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(12\)60272-4](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(12)60272-4).

Ohlsson, J. and Villarreal, G. (2005) 'Normal visual acuity in 17–18 year olds', *Acta Ophthalmologica Scandinavica*, 83(4), pp. 487–491. Available at: <https://doi.org/10.1111/j.1600-0420.2005.00516.x>.

Pinto, V.H. da S. (2019) 'Validação de um novo método de medida de refração objetiva através de um smartphone: EyeQue Personal Vision Tracker™'. Available at: <http://repositorium.sdum.uminho.pt/> (Accessed: 6 September 2022).

Razali, N.M. and Wah, Y.B. (2011) 'Power comparisons of Shapiro-Wilk, Kolmogorov-Smirnov, Lilliefors and Anderson-Darling tests', p. 14.

Sapiens, N., Ramic, A. and Serri, J. (2022) 'At-Home Refraction Measurement', *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 63(7), pp. 4204-A0132.

Thibos, L.N. and Horner, D. (2001) 'Power vector analysis of the optical outcome of refractive surgery', *Journal of Cataract and Refractive Surgery*, 27(1), pp. 80–85. Available at: [https://doi.org/10.1016/s0886-3350\(00\)00797-5](https://doi.org/10.1016/s0886-3350(00)00797-5).

Tousignant, B. *et al.* (2020) 'Comparing the Netra smartphone refractor to subjective refraction', *Clinical and Experimental Optometry*, 103(4), pp. 501–506. Available at: <https://doi.org/10.1111/cxo.13003>.

Vision impairment and blindness (no date). Available at: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/blindness-and-visual-impairment> (Accessed: 5 September 2022).

Corporation, E. (2021, 30. Dezember). *The Science Behind EyeQue*. | EyeQue - The Leader in Smartphone Vision Tests. Abgerufen am 22. September 2022, von <https://www.eyequ.com/how-it-works/>

Hemmerich, W. (2020). StatistikGuru: Stichprobengröße für die ANOVA mit Messwiederholung berechnen. Retrieved from <https://statistikguru.de/rechner/stichprobengroesse-anova-mit-messwiederholung.html>, Abgerufen am 20. September 2022

Anhang

Messdaten DNEye Scanner

Tabelle 14: originale Messdaten mit dem DNEye Scanner für rechte und linke Augen

Rechtes Auge					Linkes Auge				
Proband	Sphäre	Cylinder	Achse	Sphärisches Äquivalent	Proband	Sphäre	Cylinder	Achse	Sphärisches Äquivalent
1	-7,28	-1,40	180,00	-7,98	1	-7,43	-1,70	170,00	-8,28
2	0,57	-0,43	173,00	0,36	2	1,07	-0,82	167,00	0,66
3	0,33	-0,76	85,00	-0,05	3	0,60	-0,67	101,00	0,27
4	-4,24	-1,10	5,00	-4,79	4	-3,24	-2,46	179,00	-4,47
5	0,28	-1,81	6,00	-0,63	5	0,30	-1,19	172,00	-0,30
6	0,34	-0,94	170,00	-0,13	6	1,23	-1,18	54,00	0,64
7	-0,53	-0,22	156,00	-0,64	7	-0,44	-0,30	136,00	-0,59
8	-0,31	-0,08	148,00	-0,35	8	-0,26	-0,47	91,00	-0,50
9	-0,02	-0,99	5,00	-0,52	9	-0,14	-0,54	168,00	-0,41
10	-0,19	-0,72	160,00	-0,55	10	-0,11	-1,20	9,00	-0,71
11	0,12	-0,22	154,00	0,01	11	-0,03	-0,02	37,00	-0,04
12	-2,15	-1,31	159,00	-2,81	12	-1,63	-0,72	174,00	-1,99
13	4,46	-2,53	177,00	3,20	13	3,87	-1,92	175,00	2,91
14	0,37	-1,51	1,00	-0,39	14	0,15	-1,56	180,00	-0,63
15	0,85	-0,88	178,00	0,41	15	1,02	-0,78	175,00	0,63
16	3,53	-1,93	13,00	2,57	16	4,43	-3,49	162,00	2,69
17	0,65	-0,94	9,00	0,18	17	0,01	-0,77	5,00	-0,38
18	-5,06	-0,19	44,00	-5,16	18	-4,95	-1,16	132,00	-5,53
19	-3,24	-2,89	9,00	-4,69	19	-3,40	-3,14	165,00	-4,97
20	0,28	-0,49	6,00	0,04	20	0,24	-0,38	170,00	0,05
21	-0,28	-0,49	13,00	-0,53	21	-0,17	-0,34	178,00	-0,34
22	-1,63	-0,77	94,00	-2,02	22	-1,90	-0,35	102,00	-2,08
23	2,72	-0,44	109,00	2,50	23	4,67	-1,18	52,00	4,08
24	0,25	-0,11	1,00	0,20	24	0,77	-0,87	2,00	0,34
25	2,50	-1,25	30,00	1,88	25	2,25	-1,25	158,00	1,63

Messdaten Phoropter

Tabelle 15: originale Messdaten mit dem Phoropter für rechte und linke Augen

Proband	Rechtes Auge					Vcc	Linkes Auge				
	Sphäre	Cylinder	Achse	Sphärisches Äquivalent			Proband	Sphäre	Cylinder	Achse	Sphärisches Äquivalent
1	-7,50	-1,50	180,00	-8,25	1,25	1	-7,50	-1,75	165,00	-8,38	
2	0,75	0,00	180,00	0,75	1,25	2	1,00	-0,75	175,00	0,63	
3	0,00	-0,75	80,00	-0,38	1,60	3	0,25	-0,75	110,00	-0,13	
4	-4,50	-1,00	15,00	-5,00	1,25	4	-3,75	-1,50	0,00	-4,50	
5	0,50	-0,75	20,00	0,13	1,00	5	0,00	-0,75	170,00	-0,38	
6	-0,50	-0,50	166,00	-0,75	1,60	6	0,50	-1,25	60,00	-0,13	
7	-0,50	-0,50	180,00	-0,75	1,60	7	-0,50	-0,50	155,00	-0,75	
8	-0,50	-0,25	90,00	-0,63	2,00	8	-0,50	-0,25	60,00	-0,63	
9	-0,25	-0,75	15,00	-0,63	1,60	9	-0,25	-0,25	155,00	-0,38	
10	0,50	-1,25	145,00	-0,13	1,60	10	0,00	-1,25	20,00	-0,63	
11	0,00	0,00	180,00	0,00	1,60	11	0,00	0,00	180,00	0,00	
12	-2,50	-1,25	165,00	-3,13	1,00	12	-1,75	-0,75	180,00	-2,13	
13	3,75	-2,25	180,00	2,63	0,60	13	3,25	-2,25	180,00	2,13	
14	0,25	-1,25	180,00	-0,38	1,25	14	0,50	-1,00	180,00	0,00	
15	1,00	-0,50	4,00	0,75	1,25	15	0,75	-0,25	173,00	0,63	
16	3,75	-1,50	20,00	3,00	1,25	16	4,00	-3,00	165,00	2,50	
17	0,50	-0,75	5,00	0,13	1,25	17	0,00	-0,50	15,00	-0,25	
18	-4,50	-0,25	60,00	-4,63	1,60	18	-4,25	-0,25	135,00	-4,38	
19	-3,25	-2,75	22,00	-4,63	1,60	19	-3,25	-2,75	177,00	-4,63	
20	0,50	-0,50	20,00	0,25	1,60	20	0,25	-0,50	180,00	0,00	
21	0,00	-0,25	180,00	-0,13	1,60	21	-0,75	0,00	180,00	-0,75	
22	-2,00	-0,75	105,00	-2,38	1,60	22	-2,00	-0,25	107,00	-2,13	
23	3,50	-0,50	90,00	3,25	1,60	23	5,00	-1,25	67,00	4,38	
24	0,25	0,00	180,00	0,25	2,00	24	1,00	-0,50	175,00	0,75	
25	2,75	-1,25	35,00	2,13	2,00	25	2,50	-1,00	165,00	2,00	

Messdaten Netra

Table 16: originale Messdaten mit Netra für rechte und linke Augen

Proband	Rechtes Auge				Linkes Auge			
	Sphäre	Cylinder	Achse	Sphärisches Äquivalent	Sphäre	Cylinder	Achse	Sphärisches Äquivalent
1	-6,50	-1,00	10,00	-7,00	-6,25	-1,75	10,00	-7,13
2	-0,50	0,00	180,00	-0,50	-0,25	0,00	180,00	-0,25
3	0,50	-0,50	100,00	0,25	0,75	-1,25	110,00	0,13
4	-5,00	-0,50	50,00	-5,25	-3,50	-2,25	180,00	-4,63
5	-0,25	-0,75	5,00	-0,63	0,25	-1,50	170,00	-0,50
6	0,50	-2,75	160,00	-0,88	1,25	-1,50	45,00	0,50
7	-1,25	0,00	180,00	-1,25	-0,50	-0,75	50,00	-0,88
8	-0,75	-0,50	15,00	-1,00	-0,50	-0,25	175,00	-0,63
9	-0,50	-1,25	150,00	-1,13	-0,75	0,00	180,00	-0,75
10	0,75	-1,25	5,00	0,13	0,25	0,00	180,00	0,25
11	-0,25	-0,75	180,00	-0,63	0,25	-0,75	105,00	-0,13
12	-1,25	-0,50	25,00	-1,50	-0,50	-1,50	155,00	-1,25
13	4,00	-1,75	20,00	3,13	4,25	-2,00	180,00	3,25
14	0,50	-2,25	170,00	-0,63	0,00	-2,00	180,00	-1,00
15	0,25	-1,75	5,00	-0,63	-0,25	-2,00	170,00	-1,25
16	4,00	-2,75	25,00	2,63	3,75	-3,00	170,00	2,25
17	-0,50	-0,75	145,00	-0,88	-0,75	-1,75	65,00	-1,63
18	-4,25	-0,25	80,00	-4,38	-4,50	0,00	180,00	-4,50
19	-4,00	-2,50	25,00	-5,25	-3,75	-2,50	165,00	-5,00
20	-0,25	-0,50	90,00	-0,50	0,00	-0,50	160,00	-0,25
21	-1,50	-0,75	120,00	-1,88	-1,25	-1,00	165,00	-1,75
22	-1,00	-2,00	110,00	-2,00	-1,50	-0,75	90,00	-1,88
23	2,25	-0,75	30,00	1,88	4,50	-0,75	10,00	4,13
24	-0,25	-0,75	10,00	-0,63	0,25	-1,25	20,00	-0,38
25	2,00	-1,25	45,00	1,38	2,00	-0,75	5,00	1,63

Messdaten Netropter

Tabelle 17: originale Messdaten mit dem Netropter für rechte und linke Augen

Proband	Rechtes Auge				1,60 1,25 1,60 1,25 1,25 1,60 1,60 1,60 1,25 1,60 1,25 1,00 0,60 1,25 1,25 1,60 1,60 1,60 1,60 1,60 1,60 1,60 1,60 1,60 1,60 2,00	Linkes Auge			
	Sphäre	Cylinder	Achse	Sphärisches Äquivalent		Sphäre	Cylinder	Achse	Sphärisches Äquivalent
1	-7,75	-1,25	180,00	-8,38	1	-8,00	-1,50	170,00	-8,75
2	0,75	0,00	180,00	0,75	2	0,50	0,00	180,00	0,50
3	0,75	-1,00	90,00	0,25	3	-0,25	-1,00	110,00	-0,75
4	-4,25	-1,00	10,00	-4,75	4	-2,75	-2,00	13,00	-3,75
5	0,00	-1,00	0,00	-0,50	5	-0,25	-0,75	18,00	-0,63
6	0,00	-1,00	180,00	-0,50	6	0,75	-1,50	62,00	0,00
7	-0,50	-0,75	0,00	-0,88	7	-0,50	-0,25	160,00	-0,63
8	-0,50	-0,25	175,00	-0,63	8	-0,75	0,00	180,00	-0,75
9	0,00	-1,00	7,00	-0,50	9	0,00	-0,25	175,00	-0,13
10	0,25	-1,00	147,00	-0,25	10	0,50	-1,50	26,00	-0,25
11	0,00	0,00	180,00	0,00	11	0,00	0,00	180,00	0,00
12	-2,25	-1,00	150,00	-2,75	12	-1,50	-1,00	15,00	-2,00
13	4,50	-1,75	20,00	3,63	13	4,25	-2,00	180,00	3,25
14	0,75	-1,25	14,00	0,13	14	1,00	-2,00	180,00	0,00
15	1,50	-0,25	172,00	1,38	15	0,75	-0,50	150,00	0,50
16	4,50	-1,00	30,00	4,00	16	5,25	-2,25	170,00	4,13
17	0,25	-0,50	18,00	0,00	17	0,25	-1,00	35,00	-0,25
18	-4,25	-0,25	37,00	-4,38	18	-4,25	-0,50	165,00	-4,50
19	-3,75	-2,50	5,00	-5,00	19	-3,75	-2,25	0,00	-4,88
20	0,00	-0,50	25,00	-0,25	20	-0,25	-0,50	165,00	-0,50
21	-0,25	0,00	180,00	-0,25	21	-0,50	0,00	180,00	-0,50
22	-2,25	-0,25	120,00	-2,38	22	-1,00	-0,75	150,00	-1,38
23	4,00	-0,75	105,00	3,63	23	5,00	-0,75	60,00	4,63
24	0,00	0,00	180,00	0,00	24	0,75	-0,50	180,00	0,50
25	2,50	-1,00	45,00	2,00	25	2,75	-0,75	170,00	2,38

Wiederholungsmessungen: Netra

Tabelle 18: originale Messdaten der Wiederholungsmessungen mit Netra für rechte und linke Augen

Proband	Rechtes Auge			Linkes Auge			
	Mmessung	Sphäre	Cylinder	Achse	Sphäre	Cylinder	Achse
Prob. 4	1. Messung	-6,5	-1	10	-6,25	-1,75	10
	2. Messung	-6,5	-1	150	-6,5	-1,5	20
	3. Messung	-6,5	-1,5	180	-6,75	-1,25	5
Prob. 1	1. Messung	-1,25	0	180	-0,5	-0,75	50
	2. Messung	-0,75	-0,75	70	0	-1,25	165
	3. Messung	-0,75	-0,75	125	-1	0	180
Prob. 8	1. Messung	0,5	-2,75	160	1,25	-1,5	45
	2. Messung	-0,5	-0,5	175	0,75	-1,25	75
	3. Messung	-0,75	-0,75	20	0,75	-2	70
Prob. 15	1. Messung	4	-2,75	25	3,75	-3	170
	2. Messung	3,5	0	180	5,25	-5,75	160
	3. Messung	5	-3	25	4,25	-4,5	160
Prob. 25	1. Messung	2	-1,25	45	2	-0,75	5
	2. Messung	2,25	-1,25	30	2,5	-1,25	170
	3. Messung	2,25	-1,25	50	2,5	-1,25	5

Wiederholungsmessungen: Netropter

Table 19: originale Messdaten der Wiederholungsmessungen mit dem Netropter für rechte und linke Augen

Proband	Rechtes Auge					Linkes Auge				
	Mmessung	Sphäre	Cylinder	Achse	Vcc	Sphäre	Cylinder	Achse	Vcc	
Prob. 4	1. Messung	-0,5	-0,75	180	1,6	-0,5	-0,25	160	1,6	
	2. Messung	-0,5	-0,5	180	1,6	0,25	-0,75	180	1,6	
	3. Messung	-0,5	-0,5	180	1,6	0,25	-0,75	180	1,6	
Prob. 1	1. Messung	-7,75	-1,25	180	1,6	-8	-1,5	170	1,6	
	2. Messung	-7,25	-1,5	180	1,6	-7,25	-1,5	173	1,6	
	3. Messung	-7,5	-1	15	1,6	-8,25	-1	165	1,6	
Prob. 8	1. Messung	0	-1	180	1,6	0,75	-1,5	62	1,6	
	2. Messung	-0,5	-0,5	180	1,25	1,25	-1,25	50	1,25	
	3. Messung	-0,25	-0,5	165	1,25	0,75	-1	65	1,25	
Prob. 15	1. Messung	4,5	-1	30	1,6	5,25	-2,25	170	1,25	
	2. Messung	4,5	-1,5	22	1,25	4,5	-2,75	170	1,25	
	3. Messung	4,5	-1,5	20	1,6	4,5	-2,75	170	1,25	
Prob. 25	1. Messung	2,5	-1	45	2	2,75	-0,75	170	2	
	2. Messung	3	-1,25	40	2	3	-1	180	1,6	
	3. Messung	3	-1,25	30	2	3,25	-0,75	3	2	

Prüfung auf Normalverteilung: SÄ, linke Augen

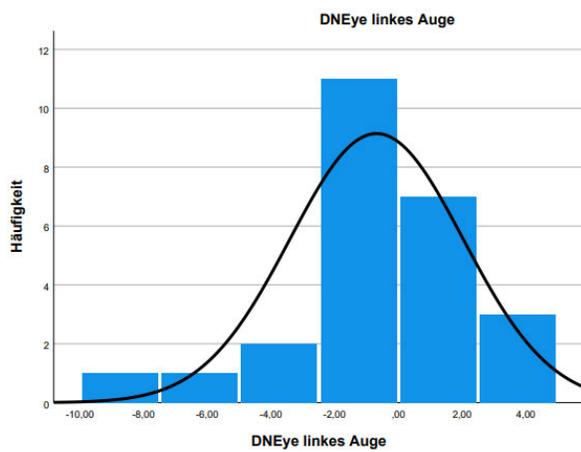


Abbildung 29: Normalverteilungskurve für die sphärischen Äquivalente des DNEye Scanners, linke Augen

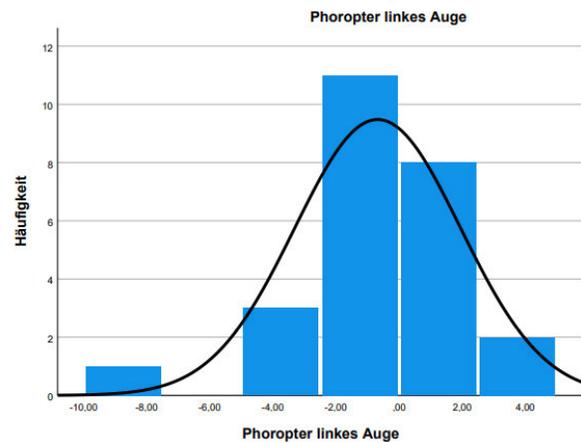


Abbildung 30: Normalverteilungskurve für die sphärischen Äquivalente des Phoropters, linke Augen

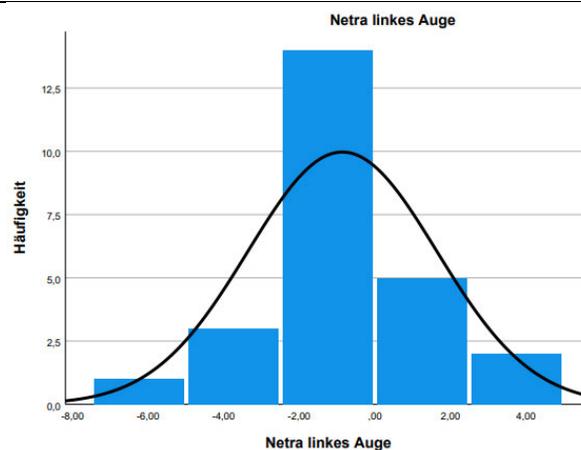


Abbildung 31: Normalverteilungskurve für die sphärischen Äquivalente von Netra, linke Augen

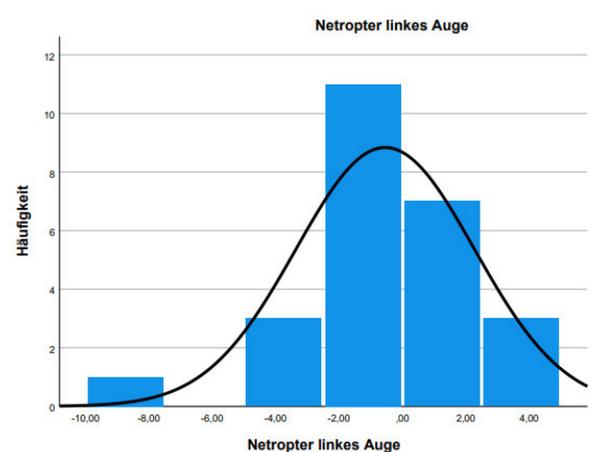


Abbildung 32: Normalverteilungskurve für die sphärischen Äquivalente des Netropters, linke Augen

Tabelle 20: Ergebnisse des Shapiro-Wilk-Tests für SÄ, linke Augen

	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Statistik	df	Signifikanz	Statistik	df	Signifikanz
DNEye rechtes Auge	,284	25	<,001	,878	25	,006
Phoropter rechtes Auge	,259	25	<,001	,896	25	,015
Netra rechtes Auge	,192	25	,018	,902	25	,021
Netropter rechtes Auge	,224	25	,002	,912	25	,033
DNEye linkes Auge	,257	25	<,001	,896	25	,015
Phoropter linkes Auge	,250	25	<,001	,900	25	,019
Netra linkes Auge	,183	25	,031	,935	25	,115
Netropter linkes Auge	,232	25	,001	,898	25	,017

a. Signifikanzkorrektur nach Lilliefors

Prüfung auf Normalverteilung: J_0 , linke Augen

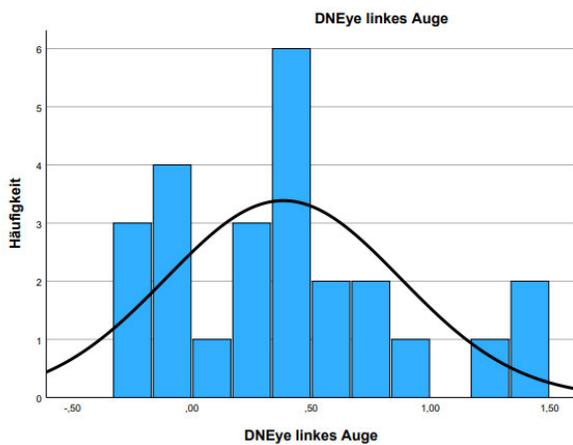


Abbildung 33: Normalverteilungskurve für J_0 des DNEye Scanners, linke Augen

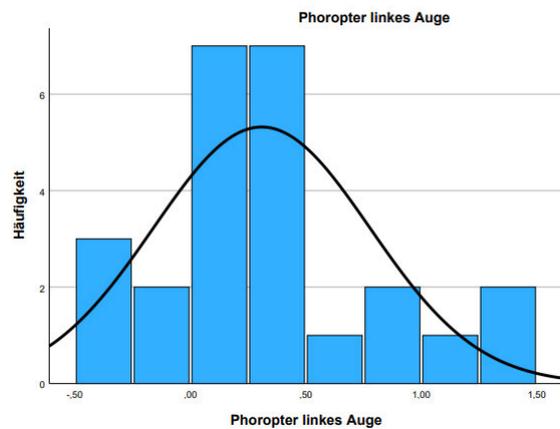


Abbildung 34: Normalverteilungskurve für J_0 des Phoropters, linke Augen

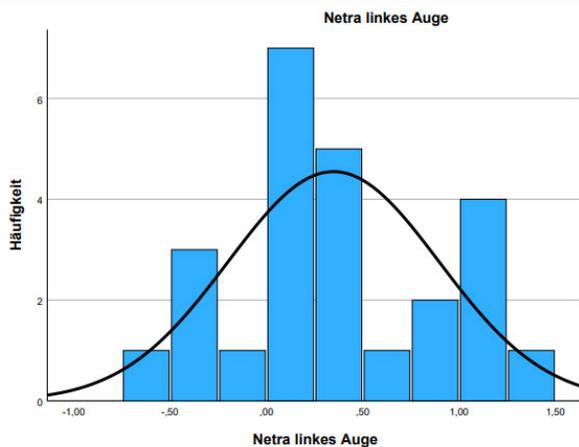


Abbildung 35: Normalverteilungskurve für J_0 von Netra, linke Augen

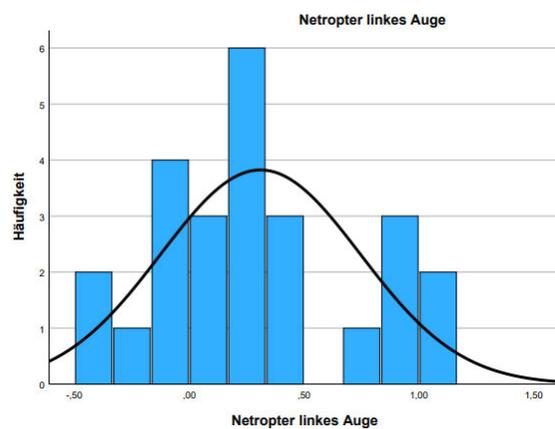


Abbildung 36: Normalverteilungskurve für J_0 des Netropters, linke Augen

Tabelle 21: Ergebnisse des Shapiro-Wilk-Tests für J_0 , linke Augen

	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Statistik	df	Signifikanz	Statistik	df	Signifikanz
DNEye linkes Auge	,125	25	,200*	,938	25	,130
Phoropter linkes Auge	,141	25	,200*	,936	25	,121
Netra linkes Auge	,137	25	,200*	,960	25	,411
Netropter linkes Auge	,155	25	,126	,926	25	,070

*. Dies ist eine untere Grenze der echten Signifikanz.

a. Signifikanzkorrektur nach Lilliefors

Prüfung auf Normalverteilung: J45, linke Augen

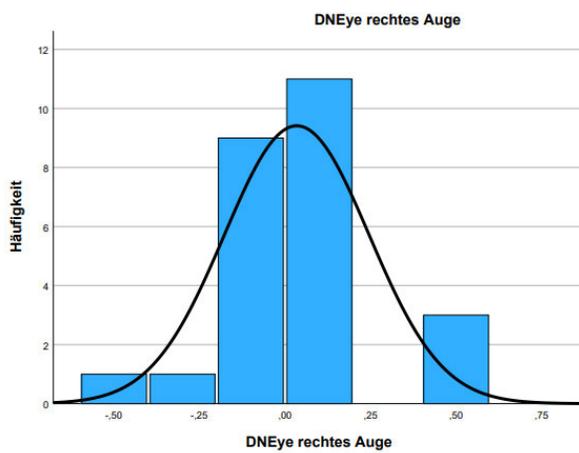


Abbildung 37: Normalverteilungskurve für J45 des DNEye Scanners, linke Augen

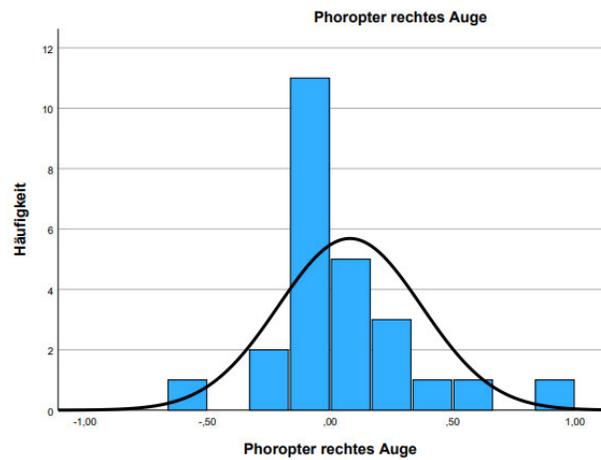


Abbildung 38: Normalverteilungskurve für J45 des Phoropters, linke Augen

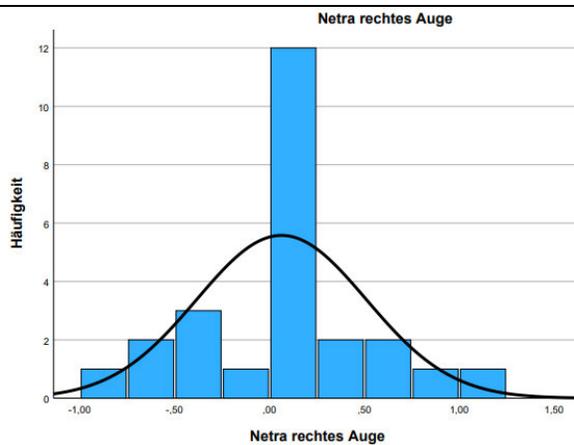


Abbildung 39: Normalverteilungskurve für J45 von Netra, linke Augen

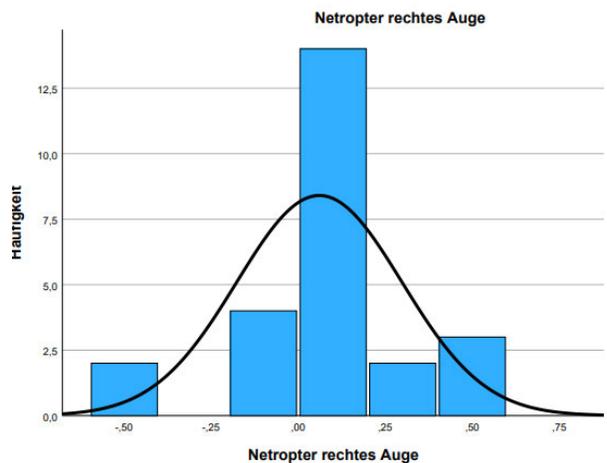


Abbildung 40: Normalverteilungskurve für J45 des Netropters, linke Augen

Tabelle 22: Ergebnisse des Shapiro-Wilk-Tests für J45, linke Augen

	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Statistik	df	Signifikanz	Statistik	df	Signifikanz
DNEye rechtes Auge	,160	25	,099	,937	25	,126
Phoropter rechtes Auge	,232	25	,001	,871	25	,004
Netra rechtes Auge	,164	25	,079	,956	25	,338
Netropter rechtes Auge	,200	25	,011	,922	25	,056

a. Signifikanzkorrektur nach Lilliefors

ANOVA: SÄ, linke Augen

Tabelle 23: Mauchly-Test auf Sphärizität der SÄ, linke Augen

Mauchly-Test auf Sphärizität^a

Maß: MASS_1

Innersubjekteffekt	Mauchly-W	Ungefähres Chi- Quadrat	df	Sig.	Epsilon ^b Greenhouse- Geisser
Geräte	,511	15,276	5	,009	,704

Mauchly-Test auf Sphärizität^a

Maß: MASS_1

Innersubjekteffekt	Epsilon ^b	
	Huynh-Feldt (HF)	Untergrenze
Geräte	,774	,333

Prüft die Nullhypothese, dass sich die Fehlerkovarianz-Matrix der orthonormalisierten transformierten abhängigen Variablen proportional zur Einheitsmatrix verhält.

- a. Design: Konstanter Term
Innersubjekt-design: Geräte
- b. Kann zum Korrigieren der Freiheitsgrade für die gemittelten Signifikanztests verwendet werden. In der Tabelle mit den Tests der Effekte innerhalb der Subjekte werden korrigierte Tests angezeigt.

Tabelle 24: Tests der Innersubjekteffekte des sphärischen Äquivalents, linke Augen

Tests der Innersubjekteffekte

Maß: MASS_1

Quelle		Typ III Quadratsumme	df	Mittel der Quadrate	F
Geräte	Sphärizität angenommen	1,254	3	,418	1,971
	Greenhouse-Geisser	1,254	2,112	,594	1,971
	Huynh-Feldt (HF)	1,254	2,321	,540	1,971
	Untergrenze	1,254	1,000	1,254	1,971
Fehler(Geräte)	Sphärizität angenommen	15,268	72	,212	
	Greenhouse-Geisser	15,268	50,688	,301	
	Huynh-Feldt (HF)	15,268	55,701	,274	
	Untergrenze	15,268	24,000	,636	

Tests der Innersubjekteffekte

Maß: MASS_1

Quelle		Sig.	Partielles Eta- Quadrat
Geräte	Sphärizität angenommen	,126	,076
	Greenhouse-Geisser	,148	,076
	Huynh-Feldt (HF)	,142	,076
	Untergrenze	,173	,076
Fehler(Geräte)	Sphärizität angenommen		
	Greenhouse-Geisser		
	Huynh-Feldt (HF)		
	Untergrenze		

Tabelle 25: Paarweise Vergleiche von SÄ aller vier Messungen, linke Augen

Paarweise Vergleiche

Maß: MASS_1

(I) Geräte	(J) Geräte	Mittelwertdifferenz (I-J)	Std.-Fehler	Sig. ^a	95% Konfidenzintervall für Differenz ^a	
					Untergrenze	Obergrenze
1	2	-,006	,081	1,000	-,238	,226
	3	,173	,144	1,000	-,241	,587
	4	-,142	,112	1,000	-,465	,181
2	1	,006	,081	1,000	-,226	,238
	3	,180	,154	1,000	-,264	,623
	4	-,136	,101	1,000	-,426	,154
3	1	-,173	,144	1,000	-,587	,241
	2	-,180	,154	1,000	-,623	,264
	4	-,316	,167	,428	-,796	,165
4	1	,142	,112	1,000	-,181	,465
	2	,136	,101	1,000	-,154	,426
	3	,316	,167	,428	-,165	,796

Basiert auf geschätzten Randmitteln

a. Anpassung für Mehrfachvergleiche: Bonferroni.

ANOVA: J₀, linke Augen

Tabelle 26: Mauchly-Test auf Sphärizität der J₀, linke Augen

Mauchly-Test auf Sphärizität^a

Maß: MASS_1

Innersubjekteffekt	Mauchly-W	Ungefähres Chi-Quadrat	df	Sig.	Epsilon ^b Greenhouse-Geisser
Geräte	,292	27,960	5	<,001	,566

Mauchly-Test auf Sphärizität^a

Maß: MASS_1

Innersubjekteffekt	Epsilon ^b	
	Huynh-Feldt (HF)	Untergrenze
Geräte	,605	,333

Prüft die Nullhypothese, dass sich die Fehlerkovarianz-Matrix der orthonormalisierten transformierten abhängigen Variablen proportional zur Einheitsmatrix verhält.

a. Design: Konstanter Term
Innersubjekt-design: Geräte

b. Kann zum Korrigieren der Freiheitsgrade für die gemittelten Signifikanztests verwendet werden. In der Tabelle mit den Tests der Effekte innerhalb der Subjekte werden korrigierte Tests angezeigt.

Tabelle 27: Tests der Innersubjekteffekte von Jo, linke Augen

Tests der Innersubjekteffekte

Maß: MASS_1

Quelle		Typ III Quadratsumme	df	Mittel der Quadrate	F
Geräte	Sphärizität angenommen	,094	3	,031	,790
	Greenhouse-Geisser	,094	1,698	,055	,790
	Huynh-Feldt (HF)	,094	1,814	,052	,790
	Untergrenze	,094	1,000	,094	,790
Fehler(Geräte)	Sphärizität angenommen	2,844	72	,039	
	Greenhouse-Geisser	2,844	40,762	,070	
	Huynh-Feldt (HF)	2,844	43,542	,065	
	Untergrenze	2,844	24,000	,118	

Tests der Innersubjekteffekte

Maß: MASS_1

Quelle		Sig.	Partielles Eta- Quadrat
Geräte	Sphärizität angenommen	,504	,032
	Greenhouse-Geisser	,442	,032
	Huynh-Feldt (HF)	,449	,032
	Untergrenze	,383	,032
Fehler(Geräte)	Sphärizität angenommen		
	Greenhouse-Geisser		
	Huynh-Feldt (HF)		
	Untergrenze		

Tabelle 28: Paarweise Vergleiche von J_0 aller vier Messungen, linke Augen

Paarweise Vergleiche

Maß: MASS_1

(I) Geräte	(J) Geräte	Mittelwertdifferenz (I-J)	Std.-Fehler	Sig. ^a	95% Konfidenzintervall für Differenz ^a	
					Untergrenze	Obergrenze
1	2	,074	,032	,185	-,019	,167
	3	,035	,065	1,000	-,152	,221
	4	,073	,040	,491	-,042	,188
2	1	-,074	,032	,185	-,167	,019
	3	-,039	,077	1,000	-,259	,181
	4	-,001	,036	1,000	-,105	,102
3	1	-,035	,065	1,000	-,221	,152
	2	,039	,077	1,000	-,181	,259
	4	,038	,070	1,000	-,164	,240
4	1	-,073	,040	,491	-,188	,042
	2	,001	,036	1,000	-,102	,105
	3	-,038	,070	1,000	-,240	,164

Basiert auf geschätzten Randmitteln

a. Anpassung für Mehrfachvergleiche: Bonferroni.

ANOVA: J_{45} , linke Augen

Tabelle 29: Mauchly-Test auf Sphärizität der J_{45} , linke Augen

Mauchly-Test auf Sphärizität^a

Maß: MASS_1

Innersubjekteffekt	Mauchly-W	Ungefähres Chi-Quadrat	df	Sig.	Epsilon ^b Greenhouse-Geisser
Geräte	,363	23,034	5	<,001	,690

Mauchly-Test auf Sphärizität^a

Maß: MASS_1

Innersubjekteffekt	Epsilon ^b	
	Huynh-Feldt (HF)	Untergrenze
Geräte	,756	,333

Prüft die Nullhypothese, dass sich die Fehlerkovarianz-Matrix der orthonormalisierten transformierten abhängigen Variablen proportional zur Einheitsmatrix verhält.

a. Design: Konstanter Term
Innersubjekt-design: Geräte

b. Kann zum Korrigieren der Freiheitsgrade für die gemittelten Signifikanztests verwendet werden. In der Tabelle mit den Tests der Effekte innerhalb der Subjekte werden korrigierte Tests angezeigt.

Tabelle 30: Tests der Innersubjekteffekte von J₄₅, linke Augen

Tests der Innersubjekteffekte

Maß: MASS_1

Quelle		Typ III Quadratsumme	df	Mittel der Quadrate	F
Geräte	Sphärizität angenommen	,299	3	,100	2,493
	Greenhouse-Geisser	,299	2,070	,144	2,493
	Huynh-Feldt (HF)	,299	2,268	,132	2,493
	Untergrenze	,299	1,000	,299	2,493
Fehler(Geräte)	Sphärizität angenommen	2,873	72	,040	
	Greenhouse-Geisser	2,873	49,678	,058	
	Huynh-Feldt (HF)	2,873	54,443	,053	
	Untergrenze	2,873	24,000	,120	

Tests der Innersubjekteffekte

Maß: MASS_1

Quelle		Sig.	Partielles Eta- Quadrat
Geräte	Sphärizität angenommen	,067	,094
	Greenhouse-Geisser	,091	,094
	Huynh-Feldt (HF)	,085	,094
	Untergrenze	,127	,094
Fehler(Geräte)	Sphärizität angenommen		
	Greenhouse-Geisser		
	Huynh-Feldt (HF)		
	Untergrenze		

Tabelle 31: Paarweise Vergleiche von J_{45} aller vier Messungen, linke Augen

Paarweise Vergleiche

Maß: MASS_1

(I) Geräte	(J) Geräte	Mittelwertdifferenz (I-J)	Std.-Fehler	Sig. ^a	95% Konfidenzintervall für Differenz ^a	
					Untergrenze	Obergrenze
1	2	-,079	,035	,214	-,181	,023
	3	-,091	,066	1,000	-,282	,100
	4	-,154	,055	,061	-,312	,005
2	1	,079	,035	,214	-,023	,181
	3	-,012	,067	1,000	-,205	,180
	4	-,075	,036	,290	-,178	,029
3	1	,091	,066	1,000	-,100	,282
	2	,012	,067	1,000	-,180	,205
	4	-,062	,068	1,000	-,259	,134
4	1	,154	,055	,061	-,005	,312
	2	,075	,036	,290	-,029	,178
	3	,062	,068	1,000	-,134	,259

Basiert auf geschätzten Randmitteln

a. Anpassung für Mehrfachvergleiche: Bonferroni.