

Klinische Monatsblätter für Augenheilkunde

2015 · 232. Band · Seite 1297–1303

www.thieme-connect.de/ejournals

Sonderdruck

Reproduzierbarkeit der Messungen der Scheimpflug- Tomografie für die Brechwerte der vorderen und hinteren Hornhautgrenzfläche

E. Stavridis, T. Eppig, N. Szentmáry, B. Seitz,
A. Langenbacher

Verlag und Copyright:

© 2015 by
Georg Thieme Verlag KG
Rüdigerstraße 14
70469 Stuttgart
ISSN 0023-2165

Nachdruck nur mit
Genehmigung des Verlages

Reproduzierbarkeit der Messungen der Scheimpflug-Tomografie für die Brechwerte der vorderen und hinteren Hornhautgrenzfläche

Reproducibility of Scheimpflug Tomography Measurements Regarding Corneal Front and Back Surface Power

Autoren

E. Stavridis¹, T. Eppig², N. Szentmáry^{1,3}, B. Seitz¹, A. Langenbacher²

Institute

¹ Klinik für Augenheilkunde, Universitätsklinikum des Saarlandes, Homburg/Saar

² Institut für Experimentelle Ophthalmologie, Universität des Saarlandes, Homburg/Saar

³ Klinik für Augenheilkunde, Semmelweis Universität, Budapest, Ungarn

Schlüsselwörter

- Kornea
- physiologische Optik
- refraktive Chirurgie

Key words

- cornea
- physiological optics
- refractive surgery

Zusammenfassung



Hintergrund: Die Oculus Pentacam® zählt zu den meistverwendeten Geräten in der Augenheilkunde und wird für die Darstellung des vorderen Augensegments verwendet. Einsatzgebiet ist u. a. die topografische Vermessung der Hornhaut zur Berechnung von Kunstlinsen. Ziel dieser Studie ist es, die Reproduzierbarkeit der Messung der Hornhautbrechwerte mit der Pentacam® zu überprüfen.

Methoden: Es wurden 25 Augen von 25 Probanden im Alter zwischen 13 und 68 ($46,7 \pm 21,7$) Jahren mit einem Refraktionsspektrum (sphärisches Äquivalent) von -4 dpt bis $+4$ dpt und einem refraktiven Zylinder ≤ 5 dpt ohne nennenswerte Erkrankungen oder Voroperationen in die Studie aufgenommen. Bei jedem Probanden wurde eine Sequenz aus 5 Messungen mit der Pentacam®, dem Zeiss IOLMaster® sowie dem Autorefraktor nach jeweiliger Neupositionierung des Kopfes und Messsystems durchgeführt. Aus den Messungen der Pentacam® wurden die Brechwerte der Hornhautvorder- und Rückfläche, die apikale Hornhautdicke und die interne Vorderkammertiefe extrahiert, aus der IOLMaster®-Messung die Brechwerte der Hornhaut und aus der Messung mit dem Autorefraktometer die Hauptschnitte der objektiven Refraktion. Für die statistische Auswertung wurde das Cronbachs α als Reproduzierbarkeitsmaß und die Korrelation der Messgrößen (Spearman-Test) herangezogen.

Ergebnisse: Die Pentacam® liefert für die Brechwerte der beiden Hornhautgrenzflächen sehr reproduzierbare Messergebnisse mit einem Cronbachs α von über 0,97 für primäre Messgrößen (z. B. Krümmungsradien) und 0,9 für davon abgeleitete Größen (z. B. Vektorkomponenten des Astigmatismus). Die Exzentrizität der beiden Hornhautflächen, die zentrale Hornhautdicke sowie die Vorderkammertiefe zeigten sehr reproduzierbare Ergebnisse mit einem α von $\geq 0,97$.

Abstract



Background and Purpose: The Oculus Pentacam® is one of the most commonly used devices in ophthalmology for assessment of the anterior eye segment. The purpose of this study was to determine the reproducibility of the corneal power as measured by the Pentacam® in a normal population.

Methods: We enrolled 25 eyes of 25 subjects aged between 13 and 68 (46.7 ± 21.7) years, within a spherical equivalent from -4 D to $+4$ D and refractive cylinder up to 5 D and without notable pathologies or history of surgery. A sequence of 5 measurements was performed using the Pentacam®, the Zeiss IOLMaster® as well as an autorefractometer after (re-)positioning the patient's head and the measurement device. From the Pentacam® we collected power data for the corneal front and back surfaces, apical corneal thickness at apex and internal anterior chamber depth. From the IOLMaster®, we extracted corneal power data, and from the autorefractometer we obtained refractive power data of both cardinal meridians. For statistical analysis, we used Cronbach's α as a measure of reproducibility and Spearman's rank correlation test for correlation of data.

Results: Pentacam® yields highly reproducible power data for both corneal surfaces, with Cronbach's α of greater than 0.97 for primary parameters (e.g. radii of curvature) and 0.9 for secondary parameters (e.g. vector components of astigmatism). Central corneal thickness and eccentricities of both surfaces as well as anterior chamber depth yielded highly reproducible values, with α of ≥ 0.97 . Corneal power derived from IOLMaster® and objective refraction extracted from the autorefractometer yielded α values of around 0.9. Mean corneal power of Pentacam® and IOLMaster® correlated well, but there was no correlation to spherical equivalent. Astigmatism values from

eingereicht 2.2.2015
akzeptiert 12.8.2015

Bibliografie

DOI <http://dx.doi.org/10.1055/s-0035-1558092>
Klin Monatsbl Augenheilkd 2015; 232: 1297–1303 © Georg Thieme Verlag KG Stuttgart · New York · ISSN 0023-2165

Korrespondenzadresse

Dr. Timo Eppig
Institut für Experimentelle Ophthalmologie
Universität des Saarlandes
Kirrberger Straße 1, Gebäude 22
66424 Homburg
Tel.: + 49/(0)68 41/1 62 21 42
Fax: + 49/(0)68 41/1 62 23 29
timo.eppig@uks.eu

Dagegen erreichten die entsprechenden Werte des IOLMasters® und des Autorefraktometers nur bei α -Werte um 0,9. Die mittleren Hornhautbrechwerte der Pentacam® und des IOLMasters® korrelierten gut miteinander, nicht jedoch mit dem sphärischen Äquivalent der Refraktion. Die Astigmatismuswerte der Pentacam® und des IOLMasters® korrelierten gut untereinander und jeweils gut mit dem refraktiven Zylinder.

Schlussfolgerung: Die Ergebnisse zeigen eine sehr hohe Reproduzierbarkeit und Zuverlässigkeit der Pentacam®-Messungen bei der Messung von Probanden ohne pathologischen Befund des vorderen Augenabschnitts.

Hintergrund

Die Oculus Pentacam® (Oculus Optikgeräte GmbH, Wetzlar) ist eines der modernsten Tomografiesysteme zur Vermessung von Hornhaut, Vorderkammer und vorderem Bereich der Linse. Sie bietet eine komplette Darstellung von charakteristischen Kenngrößen für die Hornhaut und eine umfassende räumliche Abbildung des vorderen Augenabschnitts [1–5]. Bei der Pentacam® wird eine Schnittbildanalyse des vorderen Augenabschnitts unter Einhaltung der Scheimpflug-Bedingung durchgeführt. Diese besagt, dass bei der fotografischen Abbildung die Bild-, Objektiv- und Schärfeebenen entweder parallel zueinander liegen oder sich in einer gemeinsamen Schnittgeraden treffen [1]. So wird bei der Pentacam® durch Rotation des Beleuchtungs- und Kamerakomplexes eine Serie von Schnittbildern in verschiedenen Meridianen erfasst, die dann an der Rotationsachse registriert und nachverarbeitet werden. So werden z.B. Strukturen in tieferen Schichten mittels inversem Raytracing korrigiert, um die Geometrie der optisch brechenden Flächen zu rekonstruieren. Vor der Einführung von Schnittbildanalyse-Systemen in die klinische Routine war die Analyse der Hornhaut nur begrenzt durchführbar und im Wesentlichen auf die Vorderfläche der Hornhaut limitiert [6]. Die Messung mit der Pentacam® wird im Sitzen durchgeführt, wobei der Patient den Blick auf eine Leuchtmarke fixiert. Der Untersucher wird bei der genauen Positionierung des Messkopfs durch Pfeilmarkierungen am Bildschirm unterstützt. Die Messung wird dabei automatisch ausgelöst, wenn die Software eine ausreichende Zentrierung des Auges erkennt. Bei einer Messung werden (je nach Einstellung) innerhalb von 1 Sekunde 25 einzelne Meridianbilder des Augenvorderabschnitts aufgenommen [7]. So werden aus den Schnittbildern die flächige Pachymetrie, Krümmungsradien bzw. Brechwerte und Exzentrizität der Hornhautvorder- und Rückfläche, das Hornhaut- und Kammer-volumen, der Kammerwinkel und die Vorderkammertiefe vermessen. Die Vorderkammertiefe kann als Abstand des vorderen Linsenapexes relativ zum vorderen oder hinteren Hornhaut-scheitel ermittelt werden (externe oder interne Vorderkammertiefe) [7].

Parameter, wie der flache, steile und mittlere Krümmungsradius bzw. Brechwert der simulierten Keratometrie sowie die Achslage des flachen und steilen Radius werden aus den Grenzflächen-daten an ca. 500 Messpunkten pro Schnittbild abgeleitet ebenso wie die Exzentrizität der Hornhautvorder- und Rückfläche oder der Durchmesser der Pupille während der Messung. Vor wenigen Jahren wurde das diagnostische Spektrum der Pentacam® durch die Einführung eines dedizierten Screeningverfahrens für Keratokonius erweitert. Die hierfür eingeführten Indizes, wie z.B. der KI (Keratokonius Index), ISV (Index of Surface Variance), IHA (Index of Height Asymmetry), Rmin (kleinster Krümmungsradius),

Pentacam® and IOLMaster® correlated well with each other and with refractive cylinder.

Conclusion: Our results indicate that measurements of anterior segment using the Pentacam® yield highly reproducible results in a normal population without major pathologies of the anterior eye segment.

TKC (Topografische Keratokoniusklassifikation) zeigen vielversprechendes Potenzial bei der Unterstützung der Diagnosestellung eines Keratokonius [2,8–10]. Darüber hinaus eignet sich die Pentacam® durch die hohe örtliche Auflösung für die Anpassung von Modelloberflächen zur Individualisierung von Modellaugen zur Linsenberechnung [11].

Die Hornhautdicke wird im Pupillenzentrum, an der dünnsten Stelle und im Apex erfasst, und der Durchmesser der Hornhaut von Limbus zu Limbus kann für die Auswahl von phaken Linsen oder Add-on-Linsen von Bedeutung sein. Darüber hinaus ist die Scheimpflug-basierte Tomografie des vorderen Augenabschnitts für die präoperative Berechnung bei torischen Linsen gut geeignet, da zum einen eine Unterscheidung in (korrigierbaren) regulären bzw. (unkorrigierbaren) irregulären Astigmatismus mithilfe einer Fourier-Analyse möglich ist, zum anderen aber auch der Astigmatismus von Vorder- und Rückfläche berücksichtigt werden kann. Durch direkte Einspeisung der Messdaten in Raytracing-basierte Berechnungsprogramme kann das potenzielle postoperative Ergebnis auch bei komplexen Hornhautgeometrien präzise berechnet und dargestellt werden [11,12].

Im Gegensatz zur Pentacam® basiert die Keratometriemessung mit dem IOLMaster® (Zeiss Meditec AG, Jena) auf der klassischen Keratometrie nach Helmholtz. Bei dieser werden beim IOLMaster® typischerweise 6 Marken auf 2 Meridianen auf die Hornhaut projiziert. Aus der Geometrie der Messanordnung sowie dem virtuellen Bild der an der Hornhautoberfläche reflektierten Marken kann auf den Krümmungsradius zurückgeschlossen werden. Bei der klassischen Keratometrie wird in einem Meridian gemessen, dessen Achslage manuell variiert werden kann, um z.B. einen Astigmatismus zu bestimmen. Beim Autorefraktometer der Fa. Canon kommt ein Projektionsverfahren zum Einsatz, bei welchem ein Ring unscharf auf die Netzhaut abgebildet wird. Mit einer Kamera wird dieses Netzhautbild beobachtet und eine Ellipse an den Ring angepasst. Aus den beiden Halbachsen und der Orientierung kann die Refraktion berechnet werden [13].

Für den klinischen Einsatz derartiger Diagnostiksysteme spielt die Reproduzierbarkeit als Grundanforderung für die klinische und wissenschaftliche Verwertung der Ergebnisse eine zentrale Rolle [14–16]. Nur wenn bei Messwiederholung durch denselben Untersucher (intra-rater reproducibility) oder einen anderen Untersucher (inter-rater reproducibility) vergleichbare Ergebnisse gewonnen werden können, kann die Messung als zuverlässig oder vertrauenswürdig eingestuft werden, auch wenn damit kein Nachweis über die Genauigkeit des Messergebnisses (accuracy oder precision) erbracht werden kann. Das Cronbachs α ist ein statistisches Maß der Verlässlichkeit (Reliabilität) einer Sequenz von Messwerten, das zeigt, wie eng die Beziehung zwischen verschiedenen Messungen eines Auges sein kann und ob diese Sequenz von Messungen aus derselben Grundgesamtheit

entstammt [17–20]. Die Reliabilität ist ein Maß für die Zuverlässigkeit sowie den Anteil der Varianz, der nicht durch Messfehler und stochastische Fluktuation, sondern durch tatsächliche Unterschiede der Messungen einer Serie erklärt werden kann [17]. Hochreliable wissenschaftliche Ergebnisse sind nahezu frei von zufälligen (stochastischen) Fehlern, d. h. bei Wiederholung eines Experiments unter gleichen Rahmenbedingungen würde das gleiche Messergebnis erzielt werden. Reliabilität ist also eine Voraussetzung für die Replizierbarkeit von Ergebnissen unter gleichen Bedingungen [17–19]. Die α -Werte werden von der Varianz zwischen den Testpersonen und der Varianz zwischen den Messungen einer Sequenz beeinflusst. Je höher die proportionale Varianz zwischen den Testpersonen, desto höher ist auch Cronbachs α [17]. Bei klinischen Studien wird ein Cronbachs α von mindestens 0,9 als hochreproduzierbar und zuverlässig charakterisiert [17]. Für den Interkorrelationskoeffizienten (ICC) zeigen Werte höher als 0,75 eine gute Reliabilität [14].

Ziel der Studie war die Evaluation der Reproduzierbarkeit der Pentacam® auf der Basis von Mehrfachmessungen bei der Berechnung von Hornhautbrechwerten in den kardinalen Meridianen und davon abgeleiteten Größen (projizierten Vektorkomponenten sowie der Exzentrizität von Hornhautvorder- und Rückfläche) sowie der Hornhautdicke, der Vorderkammertiefe und der Pupillenweite anhand eines Normalkollektivs. Die Reproduzierbarkeitswerte der Pentacam® sollen denen des IOLMasters® sowie des Autorefraktometers gegenübergestellt werden und die Kohärenz der Ergebnisse mittels Korrelationsanalysen untersucht werden.

Methoden

25 Augen (15 rechte und 10 linke Augen) von 25 freiwilligen Mitarbeitern der Klinik sowie freiwilligen Begleitpersonen von Patienten (9 männlich, 16 weiblich, im Folgenden als Probanden bezeichnet) wurden jeweils 5-mal mit der Pentacam®, dem IOLMaster® sowie mit einem Autorefraktometer (RK-2, Canon, Tokyo, Japan) durch einen erfahrenen Untersucher (ES) gemessen. Bei einem ausführlichen Gespräch mit den Probanden wurde geklärt, ob das aufwendige Untersuchungsprogramm zugemutet werden kann. Mithilfe eines Informationsblatts wurde der Grund für die Untersuchungen besprochen und das Einverständnis der Probanden eingeholt. Von der Studie ausgeschlossen wurden Probanden mit Sehveränderungen oder Refraktionsschwankungen in den vorausgegangenen 6 Monaten. Voraussetzung für die Teilnahme an der Studie war, dass am betreffenden Auge kein operativer Eingriff vorausgegangen war, keine Pathologie am vorderen Augenabschnitt oder der Netzhaut vorlag, keine Tränenfilmpathologie erkennbar war sowie der Augendruck im Bereich unterhalb 21 mmHg lag. Probanden, die in den vorausgegangenen 12 Monaten weiche oder harte Kontaktlinsen getragen hatten, wurden von der Studie ausgeschlossen.

Aus den Messungen der Pentacam® wurden jeweils für die Hornhautvorder- und Rückfläche der Brechwert im steilen und flachen Meridian mit Achsenlage des flachen Meridians, der mittlere Brechwert, die Exzentrizität der Vorder- und Rückfläche, die Hornhautdicke im Apex sowie die interne Vorderkammertiefe protokolliert. Die Brechwerte der beiden kardinalen Hornhautmeridiane der Vorder- und Rückfläche wurden nach der Methode von Alpins in Vektorkomponenten (Äquivalentbrechwert, und Projektion des Astigmatismus auf die geraden und schrägen Achsen) zerlegt [21–24].

Weiter wurden aus der Messung des IOLMasters® und der Messung des Autorefraktometers die Hornhautbrechwerte bzw. die Refraktion in den beiden Hauptschnitten extrahiert und in Vektorkomponenten zerlegt. Die Konsistenz der Ergebnisse der Hornhautbrechwertmessung mit dem IOLMaster® sowie der Refraktionsbestimmung mit dem Autorefraktometer bei einer Sequenz von 5 Wiederholungsmessungen sollte als Referenz dienen, um die entsprechenden Werte der Pentacam® einordnen zu können.

Die erhobenen Daten wurden in eine individuell für diese Studie entwickelte Access-Datenbank (Access 2010, Microsoft, Redmond, USA) eingegeben. Für die statistische Auswertung wurde SPSS (SPSS Version 19, IBM Corp., Armonk, USA) verwendet. Das Signifikanzniveau wurde auf $p=0,05$ festgelegt (Fehler 1. Ordnung von maximal 5%). Mit der Verwendung der Rangkorrelationsanalyse nach Spearman (2-seitig) wurde der Zusammenhang zwischen Parametern überprüft.

Ergebnisse

Das Alter der Probanden lag zwischen 13 bis 68 Jahren ($46,7 \pm 21,7$, Median 51 Jahre). Die Refraktion (sphärisches Äquivalent) lag im Bereich zwischen -4 dpt und $+4$ dpt und der refraktive Zylinder bei maximal 5 dpt.

• **Tab. 1** zeigt die Auswertung der Cronbachs- α -Werte für die Messwerte und daraus abgeleiteten Werte der Pentacam® aus den Sequenzen der 5 Einzelmessungen für jeden Probanden. Die Werte für das Cronbachs α liegen für die primären Messgrößen des Brechwertes am steilen und flachen Meridian der Hornhaut an der Vorder- und Rückfläche sowie der Exzentrizität beider Flächen, der zentralen Hornhautdicke und der Pupillenweite durchgängig oberhalb von 0,97 und implizieren eine sehr gute Reproduzierbarkeit der Messergebnisse. Die aus den primären Größen durch eine Vektorzerlegung des Astigmatismus in Komponenten abgeleiteten Größen wiesen für die Hornhautrückfläche einen geringeren α -Wert von etwa 0,9 auf.

• **Tab. 2** gibt eine Übersicht über die Cronbachs- α -Werte für die Vermessung der Keratometerwerte mit dem IOLMaster® und die Ergebnisse der automatischen objektiven Refraktionsmessung mit dem Autorefraktometer. Die Werte für das Cronbachs α liegen sämtlich im Bereich von 0,879 bis 0,910, sind also als grenzwertig reproduzierbar zu betrachten.

In **Tab. 3** sind im oberen Teil für die jeweils 1. Messung der Messsequenz eines Probanden die Zusammenhänge zwischen dem sphärischen Äquivalent (SÄQ) der objektiven Refraktion, dem Äquivalentbrechwert der Keratometrie des IOLMasters® sowie dem Äquivalentbrechwert der beiden Hornhautgrenzflächen, gemessen mit der Pentacam®, dargestellt. Im unteren Teil sind die entsprechenden Zusammenhänge für den Zylinder der objektiven Refraktion, den Astigmatismus der Keratometrie des IOLMasters® sowie den Astigmatismus der beiden Hornhautgrenzflächen, gemessen mit der Pentacam®, dargestellt.

Das sphärische Äquivalent der objektiven Refraktion weist keinen Zusammenhang mit dem mittleren Hornhautbrechwert auf, wohingegen der mittlere Brechwert der Hornhaut (IOLMaster®) und der mittlere Brechwert der Hornhautvorderfläche (Pentacam®) sehr gut miteinander korrelieren. Der mittlere Brechwert der Hornhautrückfläche (Pentacam®) korreliert invers mit dem mittleren Hornhautbrechwert des IOLMasters® und sehr gut (invers) mit dem mittleren Brechwert der Hornhautvorderfläche, gemessen mit der Pentacam®. Die Messgrößen refraktiver Zylinder

Tab. 1 Cronbachs α als statistisches Maß für die Reproduzierbarkeit der Messwerte der Pentacam[®] sowie davon abgeleitete Größen für eine Studiengruppe von 25 Normalprobanden. Die abgeleiteten Größen Km, C_{0°} und C_{45°} gehen aus der Vektorzerlegung des Astigmatismus hervor und bezeichnen den Mittelwert aus steilem und flachem Brechwert der beiden Hornhautmeridiane sowie die Projektion des Astigmatismus auf die geraden Achsen (0° und 90°) und die schrägen Achsen (45° und 135°).

| Messparameter | Art der Messgröße | Hornhautvorderfläche Cronbachs α | Hornhaurückfläche Cronbachs α |
|---------------------------------|-----------------------|--|---|
| Brechwert flacher Meridian (Kf) | primäre Messgröße | 0,998 | 0,996 |
| Brechwert steiler Meridian (Ks) | | 0,999 | 0,998 |
| Astigmatismus | | 0,987 | 0,978 |
| Exzentrizität (ϵ) | | 0,977 | 0,989 |
| mittlerer Brechwert (Km) | abgeleitete Messgröße | 0,999 | 0,998 |
| Astigmatismus C _{0°} | | 0,984 | 0,907 |
| Astigmatismus C _{45°} | | 0,974 | 0,919 |
| Hornhautdicke am Apex (CCT) | primäre Messgröße | 0,998 | |
| Vorderkammertiefe (ACD) | | 0,998 | |
| Pupillenweite | | 0,983 | |

Tab. 2 Cronbachs α als statistisches Maß für die Reproduzierbarkeit der Messwerte der IOLMaster[®]-Messung der Hornhautbrechwerte und des Autorefraktometers (Messung der objektiven Refraktion) mit primären Messgrößen und davon abgeleiteten Größen für eine Studiengruppe von 25 Normalprobanden. Die abgeleiteten Größen SE/SÄQ, C_{0°} und C_{45°} gehen aus der Vektorzerlegung des Astigmatismus hervor und bezeichnen den Mittelwert aus steilem und flachem Brechwert der beiden Hornhautmeridiane/mittlere Fehlrefraktion sowie die Projektion des Astigmatismus/Zylinders auf die geraden Achsen (0° und 90°) und die schrägen Achsen (45° und 135°).

| Messparameter | Gerät | Art der Messgröße | Cronbachs α |
|---------------------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|
| Brechwert flacher Meridian (D1) | IOLMaster [®] | primäre Messgröße | 0,863 |
| Brechwert steiler Meridian (D2) | | | 0,891 |
| Astigmatismus | | | 0,879 |
| mittlerer Brechwert (SE) | | | abgeleitete Messgröße |
| Astigmatismus C _{0°} | 0,887 | | |
| Astigmatismus C _{45°} | 0,891 | | |
| Refraktion Hauptschnitt 1 | Autorefraktometer | primäre Messgröße | 0,891 |
| Refraktion Hauptschnitt 2 | | | 0,910 |
| refraktiver Zylinder | | | 0,904 |
| sphärisches Äquivalent (SÄQ) | | abgeleitete Messgröße | 0,902 |
| Zylinder C _{0°} | 0,885 | | |
| Zylinder C _{45°} | 0,889 | | |

Tab. 3 Korrelationskoeffizienten r und Signifikanzniveau p bezogen aus der jeweils 1. Messung der Messsequenz eines Probanden. Im oberen Teil sind die Zusammenhänge zwischen dem sphärischen Äquivalent (SÄQ) der objektiven Refraktion, dem Äquivalentbrechwert der Keratometrie (IOLMasters[®]) sowie dem Äquivalentbrechwert der beiden Hornhautgrenzflächen (Pentacam[®]) dargestellt. Im unteren Teil sind die Zusammenhänge für den Zylinder der objektiven Refraktion, den Astigmatismus der Keratometrie (IOLMasters[®]) sowie den Astigmatismus der beiden Hornhautgrenzflächen (Pentacam[®]), aufgeführt.

| | SÄQ Refraktion (p) | SE IOLMaster [®] (p) | Km Pentacam [®] Vorderfläche (p) | Km Pentacam [®] Rückfläche (p) |
|---|-----------------------------|---|---|---|
| SÄQ Refraktion (r) | | 0,965 | 0,438 | 0,444 |
| SE IOLMaster [®] (r) | - 0,009 | | 0,003 | 0,015 |
| Km Pentacam [®] Vorderfläche (r) | - 0,163 | 0,575 | | < 0,001 |
| Km Pentacam [®] Rückfläche (r) | 0,160 | - 0,479 | - 0,878 | |
| | Refraktiver Zylinder (p) | Astigmatismus IOLMaster [®] (p) | Astigmatismus Pentacam [®] Vorderfläche (p) | Astigmatismus Pentacam [®] Rückfläche (p) |
| Refraktiver Zylinder (r) | | < 0,001 | 0,007 | 0,028 |
| Astigmatismus IOLMaster [®] (r) | - 0,655 | | 0,007 | 0,002 |
| Astigmatismus Pentacam [®] Vorderfläche (r) | - 0,528 | 0,526 | | < 0,001 |
| Astigmatismus Pentacam [®] Rückfläche (r) | 0,439 | - 0,579 | - 0,788 | |

der der objektiven Refraktion, Hornhautastigmatismus, gemessen mit dem IOLMaster[®], und Astigmatismus der Hornhautvorder- und Rückfläche (Pentacam[®]) zeigen eine sehr gute Korrelation untereinander, wobei der refraktive Zylinder und der Astig-

matismus der Hornhaurückfläche eine gegenläufige Tendenz (inverse Korrelation) zum Hornhautastigmatismus (IOLMaster[®]), und dem Astigmatismus der Hornhautvorderfläche (Pentacam[®]) aufweisen.

Tab. 4 Korrelationskoeffizienten r und Signifikanzniveau p bezogen aus der jeweils 1. Messung der Messsequenz eines Probanden. Die Tabelle zeigt die Zusammenhänge zwischen den Vektorkomponenten des refraktiven Zylinders der objektiven Refraktion, dem Astigmatismus der Keratometrie (IOLMaster®) sowie dem Astigmatismus der beiden Hornhautgrenzflächen (Pentacam®). Im oberen Teil sind die Zusammenhänge der Komponenten auf den geraden Achsen (0° bzw. 90°) und im unteren Teil die entsprechenden Zusammenhänge zwischen den Komponenten der schrägen Achsen (45° , 135°) dargestellt.

| | refraktiver Zylinder 0° | IOLMaster® Astigmatismus 0° | Pentacam® Vorderfläche Astigmatismus 0° | Pentacam® Rückfläche Astigmatismus 0° |
|--|------------------------------------|--|--|--|
| refraktiver Zylinder 0° | | $p < 0,001$ | $p = 0,058$ | $p = 0,050$ |
| IOLMaster® Astigmatismus 0° | $r = -0,737$ | | $p = 0,025$ | $p = 0,062$ |
| Pentacam® Vorderfläche Astigmatismus 0° | $r = -0,384$ | $r = 0,448$ | | $p < 0,001$ |
| Pentacam® Rückfläche Astigmatismus 0° | $r = 0,396$ | $r = -0,379$ | $r = -0,797$ | |
| | refraktiver Zylinder 45° | IOLMaster® Astigmatismus 45° | Pentacam® Vorderfläche Astigmatismus 45° | Pentacam® Rückfläche Astigmatismus 45° |
| refraktiver Zylinder 45° | | $p = 0,379$ | $p = 0,023$ | $p = 0,165$ |
| IOLMaster® Astigmatismus 45° | $r = 0,184$ | | $p = 0,825$ | $p = 0,010$ |
| Pentacam® Vorderfläche Astigmatismus 45° | $r = -0,452$ | $r = -0,460$ | | $p = 0,899$ |
| Pentacam® Rückfläche Astigmatismus 45° | $r = -0,286$ | $r = -0,504$ | $r = -0,027$ | |

Tab. 4 zeigt für die jeweils 1. Messung der Messsequenz eines Probanden die Zusammenhänge zwischen den Vektorkomponenten des Zylinders der objektiven Refraktion, dem Astigmatismus der Keratometrie (IOLMaster®) sowie dem Astigmatismus der beiden Hornhautgrenzflächen (Pentacam®). Im oberen Teil sind die Zusammenhänge der Komponenten auf den geraden Achsen (0° bzw. 90°) dargestellt, während im unteren Teil die entsprechenden Zusammenhänge zwischen den Komponenten der schrägen Achsen (45° , 135°) gezeigt sind.

Die Vektorkomponente für die geraden Achsen zeigt eine sehr gute inverse Korrelation zwischen dem refraktiven Zylinder der objektiven Refraktion und dem Astigmatismus (IOLMaster®) sowie dem Astigmatismus der beiden Grenzflächen der Hornhaut (Pentacam®). Der Astigmatismus des IOLMasters® korreliert mit dem Astigmatismus der Hornhautvorderfläche, gemessen mit der Pentacam®. Die Vektorkomponente für die schrägen Achsen zeigt eine Korrelation zwischen dem refraktiven Zylinder der objektiven Refraktion und dem Astigmatismus der Hornhautvorderfläche (Pentacam®), sowie zwischen dem Astigmatismus des IOLMasters® und dem Astigmatismus der Hornhaurückfläche (Pentacam®).

Diskussion



In dieser Studie wurde die Reproduzierbarkeit der Pentacam® durch Messsequenzen, bestehend aus 5 Messungen, überprüft. Mit der Pentacam® wurden bei 25 Probanden 5-mal hintereinander, jeweils nach Neupositionierung des Kopfes der Probanden in der Kinnstütze und Positionierung des Messsystems, verschiedene Parameter erhoben. Entsprechend wurden für alle Patienten 5 Messungen mit dem IOLMaster® und dem Autorefraktometer durchgeführt, um die Reproduzierbarkeit der Pentacam® bei Mehrfachmessung in Relation zu setzen zu etablierten Messsystemen wie dem IOLMaster® und zur objektiven Refraktion, welche mit einem Autorefraktometer gemessen wurde.

Aus der Pentacam® wurden die Daten der beiden kardinalen Hornhautmeridiane jeweils für die Vorderfläche und Rückfläche, die Exzentrizität beider Hornhautflächen sowie die Hornhautdicke am Apex der Hornhaut, die interne Vorderkammertiefe, ge-

messungen vom hinteren Hornhautscheitel bis zum vorderen Apex der kristallinen Augenlinse, und die Pupillenweite bei der Messung berücksichtigt. Aus der Messung mit dem IOLMaster® wurden die beiden kardinalen Hornhautmeridiane extrahiert, welche auf der Basis einer Projektion von 6 Marken auf die Hornhaut ermittelt werden. Diese Messung ist mit der Messung mit einem manuellen Keratometer vergleichbar. Vom Autorefraktometer wurden die beiden Hauptschnitte der objektiven Refraktion herangezogen.

Aus den kardinalen Meridianen der beiden Hornhautgrenzflächen, gemessen mit der Pentacam®, den kardinalen Meridianen der Hornhaut, gemessen mit dem IOLMaster®, sowie den Hauptschnitten der objektiven Refraktion, gemessen mit dem Autorefraktometer, wurden anschließend der mittlere Brechwert (Äquivalentbrechwert) bzw. das sphärische Äquivalent, der Astigmatismus bzw. refraktive Zylinder und nach der Methode von Alpins eine Projektion des Astigmatismus auf die geraden und schrägen Achsen berechnet [21]. Diese Vektorkomponenten erlauben einen direkten Vergleich verschiedener Messverfahren, indem jede Komponente für sich isoliert verglichen werden kann. In der dem Augenarzt geläufigen Standardnotation, dargestellt durch den Betrag des Astigmatismus und die Ausrichtung der Achse, ist ein direkter Vergleich dagegen nicht möglich, da beide Größen nicht orthogonal sind und die Achse des Astigmatismus bzw. des Zylinders einer Periodizität von 180° unterliegt [22, 23].

Für die Untersuchung der Reproduzierbarkeit der Messwerte der 3 untersuchten Messsysteme wurde Cronbachs α als Maßzahl herangezogen [17–19]. Für medizinische Anwendungen gilt, dass bei α -Werten von $\geq 0,9$ davon ausgegangen werden kann, dass ein Messsystem reproduzierbare Ergebnisse liefert [17]. Davon unberührt bleibt, dass damit die Genauigkeit bzw. Präzision der Ergebnisse aus der Reproduzierbarkeit nicht abgeleitet werden kann. Für die Studie wurde bewusst nach jeder Einzelmessung einer Messsequenz die Position des Kopfes eines Probanden und das Messsystem neu ausgerichtet, sodass die Mehrfachmessung nicht die Wiederholgenauigkeit, sondern vielmehr die Reproduzierbarkeit charakterisiert.

In Zusammenschau der Ergebnisse wird festgestellt, dass die Pentacam® ein hochreproduzierbares diagnostisches System für die

Bestimmung der Hornhautbrechwerte wie auch die Bestimmung der Hornhautdicke am Apex, die Vorderkammertiefe sowie die Pupillenweite ist. Die aus der 5-fach-Messung bestimmten α -Werte für die primären Messgrößen wie auch die daraus abgeleiteten Vektorkomponenten lagen alle deutlich oberhalb von 0,9. Vergleicht man mit den entsprechenden α -Werten für die Mehrfachmessung der Keratometerwerte mit dem IOLMaster® oder die Bestimmung der objektiven Refraktion mit dem Autorefraktometer, so wurden für diese Modalitäten geringere Werte für α bestimmt, was auf eine größere Streuung der Messwerte hindeutet. Dies gilt sowohl für die primären Messgrößen wie auch die daraus abgeleiteten Komponenten der Vektordarstellung.

Erwartungsgemäß korreliert das sphärische Äquivalent der objektiven Refraktion nicht mit den mittleren Hornhautbrechwerten, gemessen mit der Pentacam® oder dem IOLMaster®. Dagegen sind die Äquivalentbrechwerte der Hornhaut, gemessen mit dem IOLMaster®, und die Brechwerte der Vorder- und Rückfläche, gemessen mit der Pentacam®, erwartungsgemäß korreliert.

Der refraktive Zylinder der objektiven Refraktion und die Astigmatismuswerte, gemessen mit dem IOLMaster®, und die der beiden Hornhautgrenzflächen, gemessen mit der Pentacam®, korrelieren jeweils miteinander. Dasselbe gilt auch für die daraus abgeleiteten Vektorkomponenten. Die inverse Korrelation des Astigmatismus der Hornhautvorderfläche und der Hornhautrückfläche ist der Tatsache geschuldet, dass unter physiologischen Bedingungen beide Grenzflächen der Hornhaut im Krümmungsprofil weitestgehend einer Proportionalität folgen: In der Regel liegt der steile Meridian der Vorderfläche kollinear zum steilen Meridian der Rückfläche und der flache Meridian der Vorderflächen kollinear zum flachen Meridian der Rückfläche. Aufgrund des positiven Brechungsindexübergangs an der Grenzfläche von Luft zu Hornhaut und des negativen Brechungsindexübergangs an der Grenzfläche von Hornhaut zu Kammerwasser leitet sich die hier gefundene inverse Korrelation der Astigmatismuswerte beider Hornhautgrenzflächen direkt ab. Ebenso wenig überrascht, dass die Achse des Minuszylinders in der Refraktion in der Regel kollinear zur Achse des (positiven) Hornhautastigmatismus liegt, was die inverse Korrelation des refraktiven Zylinders zum Astigmatismus, gemessen mit dem IOLMaster®, oder dem Astigmatismus der Hornhautvorderfläche, gemessen mit der Pentacam®, erklärt.

Dagegen überrascht, dass bei Betrachtung der Vektorkomponenten für die geraden Achsen der Astigmatismus, gemessen mit dem IOLMaster®, nicht mit dem Rückflächenastigmatismus, gemessen mit der Pentacam®, korreliert und der refraktive Zylinder der objektiven Refraktion zwar mit dem Astigmatismus, gemessen mit dem IOLMaster®, nicht aber mit dem Astigmatismus der beiden Hornhautgrenzflächen, gemessen mit der Pentacam®, korreliert. Ebenso überrascht, dass bei Betrachtung der Vektorkomponenten für die schrägen Achsen ausschließlich der refraktive Zylinder der objektiven Refraktion mit dem Astigmatismus der Vorderfläche, gemessen mit der Pentacam®, und der Astigmatismus, gemessen mit dem IOLMaster®, mit dem Astigmatismus der Rückfläche, gemessen mit der Pentacam®, korrelieren.

Read et al. haben die Reliabilität sowie die Reproduzierbarkeit der Pentacam® überprüft. 39 Augen mit einem sphärischen Äquivalentmittelwert von $-3,28 \pm 2,93$ dpt wurden mit der Pentacam® gemessen [4]. Die Keratometerwerte der Vorder- und Rückfläche der Hornhaut sowie der zentralen und peripheren Hornhautkrümmung wurden analysiert. Die Messungen fanden automatisch in 6 verschiedenen Meridianen im Abstand von 60° statt.

Die Parameter wurden mithilfe des Cronbachs α und des ICC (inter-class correlation coefficient) statistisch getestet. Für die Keratometerwerte beider Hornhautflächen war die Reliabilität sehr hoch ($\alpha > 0,9$ und $ICC > 0,972$). Zusätzlich zeigte sich eine hohe Reliabilität für die Vorderflächenkrümmung ($\alpha > 0,96$, $ICC > 0,88$) im Vergleich zu den Ergebnissen der Rückfläche ($\alpha > 0,89$, $ICC > 0,74$). Allerdings wurden in dieser Arbeit keine Aussagen darüber getroffen, ob die Mehrfachmessung in Form einer Wiederholgenauigkeit oder Reproduzierbarkeit (ohne oder mit jeweiliger Neupositionierung des Patienten und des Messsystems zwischen den Messungen) durchgeführt wurde. In der vorliegenden Studie lag das Cronbachs α für die primären Parameter beider Hornhautflächen oberhalb von 0,97, was die Ergebnisse anderer Studien weitestgehend bestätigt [25–28]. Wang et al. bestätigten zudem die Reliabilität der Pentacam® für die Messung der Vorderkammertiefe [29]. Bei den abgeleiteten Messgrößen der Hornhautrückfläche lagen die Werte für Cronbachs α etwas niedriger: bei etwa 0,9. Insgesamt war die Reliabilität der Messungen der Hornhautrückfläche niedriger als die der Vorderfläche. Einzige Ausnahme stellte die Exzentrizität dar, wo Cronbachs α für die Rückfläche höher war als für die Vorderfläche (siehe **Tab. 1**).

Die Pentacam® in der Standardauflösung und die Pentacam® HR mit der verbesserten Bildauflösung sind Analysegeräte, die heutzutage aus vielen Bereichen der ophthalmologischen Diagnostik nicht mehr wegzudenken sind. So sind für die Gerätesoftware viele Erweiterungen erhältlich wie z. B. eine Screeningsoftware für die Früherkennung eines Keratokonus (Belin-Ambrósio-Modul). Umso wichtiger ist für die Klinik, dass die Ergebnisse der Pentacam® reproduzierbar sind. Durch die vollständige Vermessung des gesamten vorderen Augenabschnitts sowie mit Anbindung von Biometriegeäten zur Bestimmung der Achslänge und Integration von Raytracing-basierter Berechnungssoftware eignet sich die Pentacam® aufgrund der hohen Reliabilität möglicherweise auch zur präoperativen Berechnung und Simulation von torischen und individualisierten Kunstlinsen.

Zusammenfassend bestätigt die vorliegende Arbeit, dass mit der Pentacam® reproduzierbare Messergebnisse innerhalb eines nicht pathologischen Spektrums von Hornhautkrümmungen geliefert werden. Aussagen über die Reproduzierbarkeit der Pentacam® bei der Messung pathologischer Befunde wie beispielsweise einer Hornhautektasie nach refraktiver Hornhautchirurgie oder eines Keratokonus stehen noch aus.

Anmerkungen

▼ Teile der Studie wurden auf dem Kongress der Association for Research in Vision and Ophthalmology (ARVO) 2010 vorgestellt.

Interessenkonflikt

▼ Nein.

Literatur

- 1 Auffarth GU, Borkenstein AF, Ehmer A et al. Scheimpflug- und Topographiesysteme in der ophthalmologischen Diagnostik. *Ophthalmologie* 2008; 105: 810–817
- 2 Bühren J. Hornhauttopografie und Keratokonusdiagnostik mittels Scheimpflug-Fotografie. *Ophthalmologie* 2014; 111: 920–926
- 3 Handzel DM, Meyer CH, Wegener A. Einsatzmöglichkeiten der Scheimpflug-Technologie in der Kataraktchirurgie. *Ophthalmologie* 2014; 111: 927–934

- 4 Read SA, Collins MJ, Iskander DR *et al.* Corneal topography with Scheimpflug imaging and videokeratography: comparative study of normal eyes. *J Cataract Refract Surg* 2009; 35: 1072–1081
- 5 Sasaki K, Sakamoto Y, Shibata T *et al.* The multi-purpose camera: a new anterior eye segment analysis system. *Ophthalmic Res* 1990; 22 (Suppl. 1): S3–S8
- 6 Klyce SD. Corneal topography and the new wave. *Cornea* 2000; 19: 723–729
- 7 Oculus Optikgeräte GmbH. Oculus Pentacam®/Pentacam® HR Benutzerhandbuch; 2011: 21
- 8 Goebels S, Eppig T, Seitz B *et al.* Früherkennung des Keratokonus – systemassistierte Screening-Verfahren heute. *Klin Monatsbl Augenheilkd* 2013; 230: 998–1004
- 9 Müßig L, Zemova E, Pattmüller J *et al.* Gerätegestützte Diagnostikverfahren des Keratokonus im Vergleich. *Klin Monatsbl Augenheilkd* 2014; 231: 1215–1223
- 10 Spira C, Grigoryan A, Szentmáry N *et al.* Vergleich der Spezifität und Sensitivität verschiedener gerätegestützter Keratokonusindizes und -klassifikatoren. *Ophthalmologe* 2015; 112: 353–358
- 11 Janunts E, Kannengießner M, Langenbacher A. Parametric fitting of corneal height data to a biconic surface. *Z Med Phys* 2015; 25: 25–35
- 12 Preussner PR, Hoffmann P, Wahl J. Impact of posterior corneal surface on toric intraocular lens (IOL) calculation. *Curr Eye Res* 2015; 40: 809–814
- 13 Wesemann W. Funktionsprinzipien und Messgenauigkeit moderner Autorefraktometer. *Deutsche Optiker Zeitung* 2004; 2004 (10): 38–44
- 14 Chen D, Lam AK. Reliability and repeatability of the Pentacam on corneal curvatures. *Clin Exp Optom* 2009; 92: 110–118
- 15 Goebels SC, Seitz B, Langenbacher A. Reproducibility of the optical Biometer OA-1000 (Tomey). *BioMed Res. Int.* 2014; 2014: 1–6
- 16 Rozema JJ, Wouters K, Mathysen DG *et al.* Overview of the repeatability, reproducibility, and agreement of the biometry values provided by various ophthalmic devices. *Am J Ophthalmol* 2014; 158: 1111–1120. e1
- 17 Bland JM, Altman DG. Cronbach's alpha. *BMJ* 1997; 314: 572
- 18 Cortina JM. What is coefficient alpha? An examination of theory and applications. *J Appl Psychol* 1993; 78: 98–104
- 19 Cronbach LJ. Coefficient alpha and the internal structure of tests. *Psychometrika* 1951; 16: 297–334
- 20 Lienert GA, von Eye A. Die Konfigurations-Cluster-Analyse als Alternative zur KFA. *Z Klin Psychol Psychopathol Psychother* 1989; 37: 451–457
- 21 Alpíns N. Astigmatism analysis by the Alpíns method. *J Cataract Refract Surg* 2001; 27: 31–49
- 22 Langenbacher A, Seitz B. Computerized calculation scheme for toric intraocular lenses. *Acta Ophthalmol Scand* 2004; 82: 270–276
- 23 Langenbacher A, Seitz B. Changes in corneal power and refraction due to sequential suture removal following nonmechanical penetrating keratoplasty in eyes with keratoconus. *Am J Ophthalmol* 2006; 141: 287–293
- 24 Vilchis E, Seitz B, Langenbacher A *et al.* Limbus-parallele Keratomien mit Kompressionsnähten zur Behandlung des hohen Astigmatismus nach perforierender Keratoplastik: eine vektoranalytische und topographische Studie. *Klin Monatsbl Augenheilkd* 1997; 211: 151–158
- 25 Hernández-Camarena JC, Chirinos-Saldaña P, Navas A *et al.* Repeatability, reproducibility, and agreement between three different Scheimpflug systems in measuring corneal and anterior segment biometry. *J Refract Surg* 2014; 30: 616–621
- 26 Kawamorita T, Nakayama N, Uozato H. Repeatability and reproducibility of corneal curvature measurements using the Pentacam and Keratron topography systems. *J Refract Surg* 2009; 25: 539–544
- 27 Kawamorita T, Uozato H, Kamiya K *et al.* Repeatability, reproducibility, and agreement characteristics of rotating Scheimpflug photography and scanning-slit corneal topography for corneal power measurement. *J Cataract Refract Surg* 2009; 35: 127–133
- 28 Shetty R, Arora V, Jayadev C *et al.* Repeatability and agreement of three Scheimpflug-based imaging systems for measuring anterior segment parameters in keratoconus. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 2014; 55: 5263–5268
- 29 Wang Q, Ding X, Savini G *et al.* Anterior chamber depth measurements using Scheimpflug imaging and optical coherence tomography: Repeatability, reproducibility, and agreement. *J Cataract Refract Surg* 2015; 41: 178–185