

**Diplomarbeit**

**"Pinhole Linsen" Implantation bei Patient\*innen mit irregulä-  
rem Hornhautastigmatismus – Ein Literaturreview**

eingereicht von

**Philipp Bruchmann**

zur Erlangung des akademischen Grades

**Doktor der gesamten Heilkunde**

**(Dr. med. univ.)**

an der

**Medizinischen Universität Graz**

ausgeführt an der

**Universitäts-Augenklinik Graz**

unter der Anleitung von

**Univ.-Doz. Dr. med. univ. Navid Ardjomand**

**Dr. med. univ. Elfriede Wissiak**

Graz, am 25.08.2024

*Eidesstattliche Erklärung*

*Ich erkläre ehrenwörtlich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst habe, andere als die angegebenen Quellen nicht verwendet habe und die den benutzten Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.*

*Graz, am 25.08.2024*

*Philipp Bruchmann eh*

## **Danksagungen**

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen bedanken, die mich im Laufe dieser Arbeit sowie während meines Studiums unterstützt haben. Mein besonderer Dank gilt meiner Familie, meinen Eltern, meiner Schwester und meinen Großeltern – für ihren unermüdlichen Beistand in allen Lebenslagen. Auch meinen Freunden, die mir stets mit offenem Ohr und hilfreichen Ratschlägen zur Seite standen, gilt mein herzlicher Dank. Lieber Alex, lieber Paul, vielen Dank für das Korrekturlesen und die zahlreichen Unterstützungen.

Ein weiterer Dank gilt meinem Betreuer, Univ.-Doz. Dr. med. univ. Navid Ardjomand, der sowohl unter der Woche als auch am Wochenende stets Zeit für meine Fragen fand. Danke für die zahlreichen fachlichen Einblicke sowie die lebenspraktischen Ratschläge, die ich von dir lernen durfte.

# **Zusammenfassung**

## **Einleitung**

Die Kataraktoperation ist eine der häufigsten Operationen weltweit. Aufgrund moderner Operationstechniken und innovativer Intraokularlinsen gibt es ein sehr großes Spektrum an Methoden, die individuell an die Bedürfnisse und Umstände der Patient\*innen angepasst werden können. Bestimmte Untersuchungen und Messungen sind notwendig, um die benötigte Stärke der eingesetzten Linsen zu berechnen. Für Menschen, die aufgrund einer okulären Grunderkrankung, eines Traumas oder einer früheren Hornhautoperation unter einer unregelmäßigen Hornhaut leiden, ist eine genaue Vorhersage der postoperativen Refraktionsergebnisse in der Regel eine Herausforderung. Diese Personen leiden nach der Operation häufig an subjektiven Refraktionsschwankungen oder Blendungserscheinungen, welche für die Betroffenen meist stark einschränkend sind.

Diese Arbeit befasst sich mit einer Linse, die sich den Pinhole-Effekt zunutze macht. Sie findet bereits Verwendung in der Behandlung von Altersweitsichtigkeit. Einige Arbeiten haben bereits gezeigt, dass die Implantation dieser Art der Intraokularlinse bei Patient\*innen mit irregulärer Hornhaut zu einer postoperativen Verbesserung der Sehkraft und einer erweiterten Tiefenschärfe führt.

## **Methoden**

Diese wissenschaftliche Auseinandersetzung vergleicht sechs Arbeiten, bei denen Patient\*innen mit irregulärer Hornhaut eine IOL mit Pinhole-Effekt in den Kapselsack oder zusätzlich zu einer sphärischen Linse in den Sulcus bekommen. Es werden die Auswahlkriterien, die präoperativen Untersuchungen, sowie das Follow-up und die Ergebnisse genauer behandelt. Schließlich werden die Ergebnisse der Studien ausgewertet und verglichen, ob eine postoperative Verbesserung der Sehleistung von 0,5 Dezimal / 0.3logMAR oder mehr erreicht wird.

## **Schlussfolgerung**

Diese vergleichende Arbeit zeigt auf, dass durch die Implantation einer Pinhole Linse bei Patient\*innen mit irregulärer Hornhaut postoperativ eine Verbesserung der Sehleistung von mindestens 0.5 Dezimal / 0.3logMAR erreicht werden kann.

# **Abstract**

## **Introduction**

Cataract surgery is one of the most common operations worldwide. Thanks to modern surgical techniques and innovative intraocular lenses, there is a vast range of methods that can be customised to the individual patient's needs and circumstances. Certain examinations and measurements are necessary to calculate the required strength of the lenses used. For patients who suffer from an irregular cornea due to disease, trauma or previous corneal surgery, accurately predicting the post-operative refractive outcome usually poses a challenge. These individuals tend to suffer from subjective refractive fluctuations or glare after surgery, which is usually a major limitation for those affected.

This work deals with a lens that utilises the 'pinhole' effect. This type of lens is commonly used in the treatment of presbyopia. Some studies have shown that in patients with irregular corneas, using pinhole lenses leads to a postoperative improvement in visual acuity and an extended depth of field.

## **Methods**

This paper compares six studies in which patients with irregular corneas receive an IOL with a pinhole effect in the capsular bag, or in addition to a spherical lens in the sulcus. The selection criteria, the preoperative examinations, the follow-up and the results are discussed in more detail. Finally, the results of the studies are analysed and compared as to whether a postoperative visual performance of 0.5 decimal / 0.3logMAR or more is achieved.

## **Conclusion**

This comparative study shows that the implantation of a pinhole lens in patients with an irregular cornea can achieve a postoperative visual performance of at least 0.5 decimal / 0.3logMAR.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Danksagungen .....</b>	<b>III</b>
<b>Zusammenfassung.....</b>	<b>IV</b>
<i>Einleitung.....</i>	<i>IV</i>
<i>Methoden.....</i>	<i>IV</i>
<i>Schlussfolgerung.....</i>	<i>IV</i>
<b>Abstract.....</b>	<b>V</b>
<i>Introduction.....</i>	<i>V</i>
<i>Methods.....</i>	<i>V</i>
<i>Conclusion .....</i>	<i>V</i>
<b>Inhaltsverzeichnis .....</b>	<b>VI</b>
<b>Abkürzungen und deren Erklärung.....</b>	<b>IX</b>
<b>Abbildungsverzeichnis.....</b>	<b>X</b>
<b>Tabellenverzeichnis.....</b>	<b>XI</b>
<b>1    <b>Aufbau des Auges .....</b></b>	<b>1</b>
1.1 <i>Hornhaut.....</i>	<i>1</i>
1.2 <i>Epithel.....</i>	<i>1</i>
1.3 <i>Stroma.....</i>	<i>2</i>
1.4 <i>Endothel.....</i>	<i>2</i>
<b>2    <b>Irreguläre Hornhaut .....</b></b>	<b>3</b>
2.1 <i>Astigmatismus.....</i>	<i>3</i>
2.1.1 <i>Ektatische Hornhauterkrankungen (ECD).....</i>	<i>3</i>
<b>3    <b>Katarakt.....</b></b>	<b>7</b>
3.1 <i>Risikofaktoren.....</i>	<i>8</i>

3.2	<i>Pathogenese</i> .....	8
3.3	<i>Einteilung</i> .....	8
3.3.1	Ätiologisch Anatomische Einteilung .....	8
	Die Anatomische Einteilung wird an der Spaltlampe folgendermaßen beurteilt .....	8
3.3.2	Entwicklungsstadien .....	9
3.3.3	Indikation für eine Operation.....	10
3.4	<i>Untersuchungen</i> .....	11
3.4.1	Sehschärfe -Visus.....	11
3.4.2	Refraktionsbestimmung.....	12
3.4.3	Aberrationen .....	12
3.5	<i>Biometrie</i> .....	13
3.5.1	Axiale Bulbuslänge (AL).....	14
3.5.2	Hornhautbrechkraft .....	14
3.5.3	Vorderkammertiefe .....	14
3.5.4	White to white Abstand.....	14
3.6	<i>Formeln für die Berechnung der Intraokularlinsenstärke</i> .....	15
3.7	<i>Intraokularlinsen (IOL)</i> .....	16
3.7.1	Design .....	16
3.7.2	Material.....	17
3.7.3	Linsen Techniken .....	18
3.7.4	Untersuchungen .....	23
<b>4</b>	<b>Material und Methoden</b> .....	<b>24</b>
4.1	<i>Einschlusskriterien und Studien TeilnehmerInnen</i> .....	24
4.2	<i>Einzelanalysen der Studien</i> .....	24
4.2.1	Arbeit I- Safety and efficacy of a small-aperture capsular bag–fixated intraocular lens in eyes with severe corneal irregularities, Mehdi Shajari et al. (80) .....	25

4.2.2	Arbeit II Predictability of Refractive Outcome of a Small-Aperture Intraocular Lens in Eyes with Irregular Corneal Astigmatism, Julian Langer et al. (81).....	26
4.2.3	Arbeit III Implantation of a Small Aperture Intraocular Lens in Eyes with Irregular Corneas and Higher Order Aberrations, Fabrizio Franco et al.(82) .....	27
4.2.4	Arbeit IV Small-Aperture Intraocular Lens Implantation in a Patient with an Irregular Cornea, Tim Schultz et al. (83).....	28
4.2.5	Arbeit -V Toric intraocular lens combined with a supplementary pinhole implant to treat irregular corneal astigmatism, Bruno L.C. Trindade et al. (84) .....	28
4.2.6	Arbeit - VI A pinhole implant to correct postoperative residual refractive error in an RK cataract patient, Hyeck-Soo Son et al.(85).....	29
<b>5</b>	<b>Ergebnisse .....</b>	<b>30</b>
<b>6</b>	<b>Diskussion .....</b>	<b>35</b>
6.1	<i>Limitationen</i> .....	38
<b>7</b>	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>39</b>

## **Abkürzungen und deren Erklärung**

DPT - Dioptrien

OCT - Optische Kohärenz Tomografie

ECD - Ektatische Hornhauterkrankungen

PMD - Pelluzide marginale Degeneration

LOA - Aberrationen niederer Ordnung

HOA - Aberrationen höherer Ordnung

LASIK - Laser in situ Keratomileusis

RK - Radiale Keratotomie

PK - Perforierende Keratoplastik

AL - Axiale Bulbuslänge

WTW - White to white Durchmesser

ELP - Effektive Linsenposition

IOL - Intraokularlinsen

PMMA - Polymethylmethacrylat

PDMS - Polydimethylsiloxane

PCO - Posterior Capsula Opacification

EDOF - Extended Depth of Focus

SA - Sphärische Aberration

CA - Chromatische Aberration

ML - Monolateral

BL - Bilateral

BCVA - Best Corrected Visual Acuity-

CDVA -Corrected Distance Visual Acuity-

UDVA - Uncorrected Distance Visual Acuity-

UIVA - Uncorrected Intermediate Visual Acuity-

UNVA - Uncorrected Near Visual Acuity-

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Astigmatismus in der Scheimpflug Untersuchung .....	6
Abbildung 2 Keratokonus in der Scheimpflug Untersuchung.....	6
Abbildung 3 Keratokonus in der Scheimpflug Untersuchung.....	7
Abbildung 4 Cataracta Hyperamatura .....	9
Abbildung 5 Christbaumschmuck-Katarakt .....	10
Abbildung 6 Cataracta Nuclearis.....	10
Abbildung 7 Zernike Polynome .....	13
Abbildung 8 Biometrische Untersuchung .....	15
Abbildung 9 Multifokale Linse (Hoya Gemetric).....	19
Abbildung 10 Torische Linsen in situ.....	20
Abbildung 11 IC8-IOL .....	22

Abbildung 1-11:

Dankend zu Verfügung gestellt von der Universitäts-Augenklinik des LKH-Univ. Klinikum Graz und von Univ.- Doz. Dr. med. univ. Navid Ardjomand.

## **Tabellenverzeichnis**

Tabelle 1 IOL-Formeln(49) .....	16
Tabelle 2 Eigenschaften von Linsenmaterialien (60) .....	17
Tabelle 3 IOL Eigenschaften(70).....	21
Tabelle 4 Verwendete Pinhole-Linsen Modelle .....	24
Tabelle 5 Ergebnisse der Visuellen Sehleistungen nach Implantation einer Linse mit Pinhole Effekt Die Sehleistungen werden in verschiedenen Maßeinheiten angegeben. ...	31

# 1 Aufbau des Auges

## 1.1 Hornhaut

Die Hornhaut befindet sich im vorderen Abschnitt des Auges. Aufgrund ihrer Transparenz wird sie auch als das optische Fenster des Auges bezeichnet. Sie übernimmt mit ihren 43 dpt den größten Teil der Gesamtbrechkraft des Auges.

Mit einer seitlichen Randfurche, dem Limbus cornea ist sie mit der bindegewebigen Lederhaut verbunden. Diese bilden zusammen die äußere Hülle des Auges.

Die Hornhaut ist aus fünf Schichten aufgebaut, die bereits im zweiten Embryonalmonat angelegt werden. Diese unterteilen sich von Innen nach Außen wie folgt:

- Hornhautendothel
- Descemet Membran
- Hornhautstroma
- Bowmann Lamelle
- Epithel (1)

## 1.2 Epithel

Das Hornhautepithel ist ein mehrschichtiges, unverhorntes Plattenepithel, das die Vorderseite der Kornea bedeckt und am Limbus corneae in das Konjunktivalepithel übergeht. Die Zellen sind durch Desmosomen, Adhärens-Kontakte, Tight junctions und Gap junctions miteinander verbunden. Die flachen, oberflächlichen Zellen tragen Mikroplicae und bilden durch Tight junctions eine Diffusionsbarriere gegenüber der Tränenflüssigkeit. Das Epithel verhindert weitgehend das Eindringen von Krankheitskeimen und beteiligt sich an der Regulation des Wassergehalts im Korneastroma. Das Epithel wird, ausgehend von der Basalschicht, innerhalb von 7 Tagen vollständig erneuert. Daher heilen reine Epitheldefekte rasch und ohne Narbe ab. Die Stammzellen, die lebenslang den Zellnachschiebung gewährleisten, sitzen am Limbus und können von hier aus in das Epithel einwandern. Die Oberfläche des Korneal-Epithels sowie auch die Konjunktiva werden ständig durch den wässrigen Tränenfilm benetzt. Dies stellt eine absolute Vorbedingung für die Intaktheit von Kornea und Konjunktiva dar. Das Epithel ist reichlich mit freien Nervenendigungen versorgt und gehört zu den empfindlichsten Oberflächen des Körpers. Die Nervenfasern, die aus dem N. ophthalmicus stammen, strahlen vom Limbus aus in die Kornea ein.

### **1.3 Stroma**

Das Stroma der Kornea macht etwa 90 % ihrer Dicke aus und ist für die strukturelle Stabilität und Transparenz verantwortlich. Es besteht aus einer extrazellulären Matrix, die hauptsächlich aus Kollagenfibrillen, Proteoglykanen, Wasser und Fibroblasten besteht. Diese Fibroblasten, auch Keratozyten genannt, sind für den Auf- und Abbau der spezifischen Matrix verantwortlich.

Der oberste Bereich des Stromas, der auch Bowman-Membran oder Bowman-Lamelle genannt wird, ist etwa 18  $\mu\text{m}$  dick und erscheint lichtmikroskopisch homogen und strukturlos. Es besteht aus dünnen, verflochtenen Kollagenfibrillen und ähnelt der Basalmembran des Korneaepithels.

Der größte Teil des Stromas besteht aus Kollagenfibrillen, hauptsächlich vom Typ I, die zu Lamellen zusammengepackt sind. Zwischen diesen Lamellen befinden sich die Fibroblasten. Die Kollagenfibrillen innerhalb einer Lamelle sind parallel angeordnet, während sich ihre Ausrichtung zwischen den Lamellen ändert.

Der Raum zwischen den Kollagenfibrillen enthält Proteoglykane, insbesondere das kornea-spezifische Lumican, ein Keratansulfat-Proteoglykan. Diese Proteoglykane ziehen Wasser an und tragen zur Aufrechterhaltung des Wassergehalts im Stroma bei. Der durchschnittliche Wassergehalt des Stromas beträgt etwa 75-80 % seines Gewichts.

Insgesamt spielt das Stroma eine entscheidende Rolle bei der Struktur, Transparenz und optischen Qualität der Kornea.

### **1.4 Endothel**

Das Endothel der Kornea, auch bekannt als Epithelium posterius, ist eine einzige Schicht flacher Mesothelzellen, welche die Rückseite der Kornea bedecken. Diese Zellen haften an einer dicken Basalmembran, der Descemet-Membran, die hauptsächlich aus Kollagen VIII besteht. Das Endothel ist durch verschiedene Zellverbindungen miteinander verbunden, darunter Haftkontakte, Gap junctions und Tight junctions, die eine Diffusionsbarriere gegenüber dem Kammerwasser bilden. Diese Barriere ist entscheidend für die Kontrolle des Wassergehalts im Stroma und somit für die Transparenz der Kornea.

Ernährt wird die Kornea aus drei Richtungen, durch Diffusion aus dem Kammerwasser, von Blutgefäßschlingen am Limbus und durch den Tränenfilm. Diese Mehrfachernährung aus verschiedenen Richtungen gewährleistet eine ausreichende Nährstoffversorgung und Gesundheit der Kornea. (2)

## **2 Irreguläre Hornhaut**

Die erstmalige Diagnose eines Astigmatismus wurde im 18. Jahrhundert durch Thomas Young mithilfe eines Optometers gestellt. Damit wurde ein Grundpfeiler für die weitere Entwicklung der Diagnosemethoden gelegt. Von Placido im 19. Jahrhundert, über Orbscan, der Scheimpflug Technologie bis hin zur optischen Kohärenz Tomografie (OCT), wie wir sie heute verwenden.

### **2.1 Astigmatismus**

Dieses Phänomen beschreibt das Aufeinandertreffen parallel verlaufender Lichtstrahlen an zwei verschiedenen Brennpunkten. Aufgrund der diagnostischen Möglichkeiten kann man zwischen einem externen und einem internen Astigmatismus unterscheiden. Wobei der interne Astigmatismus mit steigendem Alter an diagnostischer Bedeutung zunimmt.(3)

#### **2.1.1 Ektatische Hornhauterkrankungen (ECD)**

ECD sind Erkrankungen, bei denen es zu einer fortschreitenden Ausdünnung mit anschließender Vorwölbung der Hornhaut kommt.(4)

Studien zeigen, dass refraktiv-chirurgische Eingriffe als iatrogene Auslöser für Hornhautektasien fungieren können. Sowohl radiale Keratotomien als auch lamellar- refraktiv - chirurgische Eingriffe können die Festigkeit der Hornhaut verringern und zu mechanischer Instabilität führen. Darüber hinaus kann das Auftreten von Ektasien auch nach LASIK-Eingriffen beobachtet werden.(5–7)

Der pathophysiologische Mechanismus, welcher der Entstehung von ECD zugrunde liegt, ist noch nicht vollständig verstanden. Es wird angenommen, dass multifaktoriellen Ursachen, einschließlich genetischer und umweltbedingter Faktoren wie mechanische Reizungen der Hornhaut durch das Tragen von Kontaktlinsen oder Augenreiben, für die Entstehung verantwortlich sind.(8–10)

### **2.1.1.1 Pelluzide marginale Degeneration**

Die pelluzide marginale Degeneration (PMD) der Hornhaut ist eine bilaterale, deutlich inferiore, periphere Hornhautverdünnung, die in der Regel an den unteren Quadranten der Hornhaut auftritt. Die genaue Ideologie ist derzeit unklar, es wird diskutiert, ob es sich bei Keratokonus, Keratoglobus und PMD um jeweils eigenständige Erkrankungen oder phänotypische Varianten einer Erkrankung handelt.(11,12) Typische Kennzeichen einer PMD sind Hornhautanomalien oberhalb der Verdünnungszone, welche eine Abflachung der Hornhaut entlang eines vertikalen Meridians zeigen und einen Astigmatismus „gegen die Regel“ aufweisen.(4,11,13)

### **2.1.1.2 Keratokonus**

Der Keratokonus ist eine bilaterale, asymmetrische Augenerkrankung, welche zu einer Ausdünnung und Versteilerung der Hornhaut führt. In Folge kommt es zum Auftreten von unregelmäßigem Astigmatismus sowie zu einer Verminderung der Sehschärfe.(14,15) Der Keratokonus tritt typischerweise im Jugendalter auf und schreitet bis zum dritten oder vierten Lebensjahrzehnt fort. (4,16,17)

#### **2.1.1.2.1 Ätiologie und Risikofaktoren**

Keratokonus ist eine Erkrankung multifaktorieller Genese. Es lässt sich eine Prävalenz für Männer erkennen, zudem zählen Augenreiben, Atopie, Sonnenexposition, Alter, familiäre Vorbelastung und das Tragen von Kontaktlinsen zu den wichtigsten Risikofaktoren.(18–21)

Genetisch lässt sich eine Prävalenz beim familiären Keratokonus erkennen mit einem autosomal dominanten und einem sporadischen Vererbungsmuster.(21)

**Auch endogene Faktoren ,welche über Zytokine zu einer Schädigung der Hornhaut führen, spielen eine Rolle in der multifaktoriellen Genese.(22)**

#### **2.1.1.2.2 Inzidenz**

In früheren Studien ging man davon aus, dass die Krankheit mit einer durchschnittlichen Inzidenz von etwa zwei pro 100 000 pro Jahr einhergeht. (4,16,17) Neuere Studien aus den

Niederlanden zeigten jedoch, dass die jährliche Inzidenz bei 1:7500 (13,3 Fälle pro 100 000) und die geschätzte Prävalenz bei 1:375 (265 Fälle pro 100 000) liegt. (14)

### **2.1.1.2.3 Pathogenese**

Die Erkrankung betrifft jede Schicht der Hornhaut. Die typisch histopathologischen Veränderungen lassen sich hauptsächlich im Epithel, der Bowmanschicht und im Stroma nachweisen, während die Bereiche um die Descemet-Membran seltener betroffen sind.(23–25) Es zeigt sich im Vergleich zu gesunden Patient\*innen, dass die Kornea der betroffenen Personen einen niedrigeren Kollagengehalt aufweist. (19) Die Ausdünnung der HH könnte das Ergebnis von multifaktoriell bedingten Abbauprozessen sein, die zum Verlust von Strukturelementen der HH führen.(17)

### **2.1.1.2.4 Diagnose**

In der ophthalmologischen Untersuchung ist oft ein fortschreitender myopischer Astigmatismus feststellbar, der sich durch unspezifische Symptome wie verschwommenes Sehen, Lichtempfindlichkeit, ein Gefühl von Nebel und durch Abnahme der Sehschärfe vor allem in der Ferne äußert. (4) Im fortgeschrittenen Stadium kann sich eine Hornhautektasie, eine Hornhautverdünnung, eine Hornhauttrübungen sowie ein kegelförmiger Vorsprung bilden. Durch Ablagerungen von Ferritin aus der Tränenflüssigkeit bildet sich innerhalb des Hornhautepithels an der Basis des Kegels ein braun gefärbter Teil oder ein Vollring, der sogenannte Fleischer Korneal Ring. Spannungslinien entlang der größten Krümmungen nennt man Vogtsche Streifen.(26)

### **2.1.1.3 Externen Astigmatismus / Anteriorer- kornealer Astigmatismus**

#### Manuelle Keratoskopie

Durch die Projektion von Placido Ringen auf die Hornhaut, kann mit der Spaltlampe oder unter dem Mikroskop zwischen flachen oder steilen Meridianen unterschieden werden.

#### Manueller Keratometer

Dabei wird die zentrale Brechkraft der vorderen Hornhautfläche mittels Ringen, welche auf die vordere Hornhautoberfläche projiziert werden, gemessen.

#### Video Keratografie - Topografie

Darunter versteht man eine Kombination der Placido-Ringe mit einem Computersystem. Sie gilt vor allem bei irregulären Veränderungen der Hornhautvorderfläche als genaue Untersuchungsmethode.(3) Diese hat dazu beigetragen, dass subtile Erscheinungsformen wie asymmetrische Bowties und schiefe radiale Achsen als wichtige topografische Muster in der Diagnosestellung früher erkannt werden können.(27)

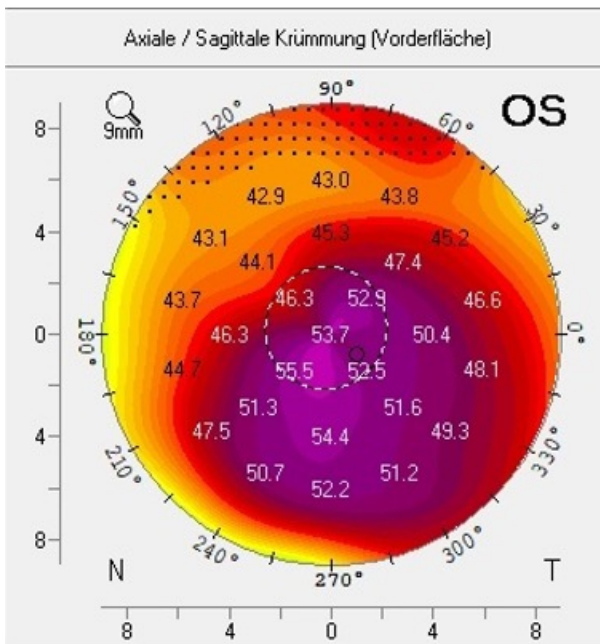


Abbildung 1 Astigmatismus in der Scheimpflug Untersuchung

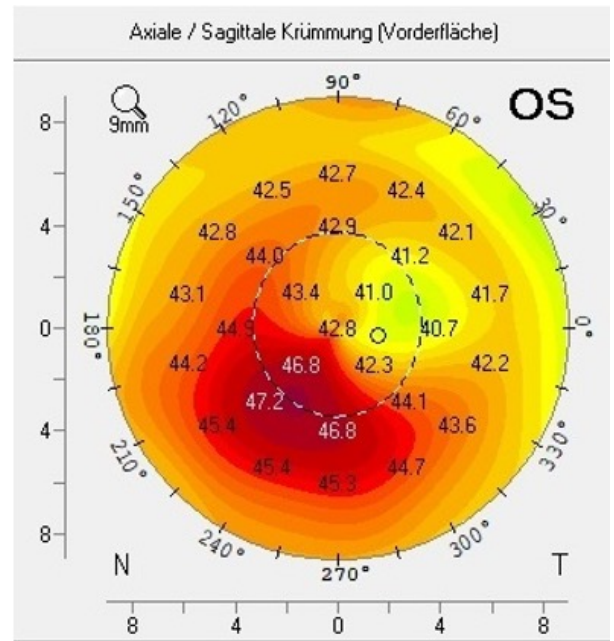
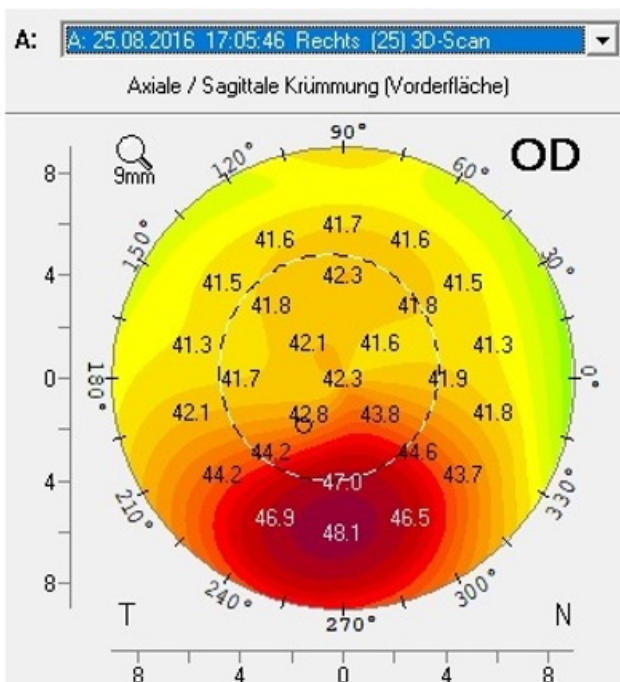


Abbildung 2 Keratokonus in der Scheimpflug Untersuchung



#### **2.1.1.4 Externer / hinterer cornealer Astigmatismus**

Die Scheimpflug- Videotomografie ermöglicht eine präzise dreidimensionale Darstellung der Hornhautstruktur. Im Gegensatz zur Placido-Topografie werden hierbei über 50.000 Punkte gemessen, was eine detaillierte Analyse der Hornhautoberfläche sowie Darstellung der hinteren Hornhautoberfläche erlaubt, wodurch speziell im Bereich der ektatischen Hornhauterkrankungen eine wichtige diagnostische Tür geöffnet wurde.(3)

#### **2.1.1.5 Gesamter okulärer Astigmatismus**

Die Optische Kohärenz Tomographie (OCT) bietet im Vergleich zur Scheimpflugkamera eine höhere Auflösung, die sich auch bei trüber Hornhaut gut eignet. Moderne Geräte können sowohl die vordere als auch die hintere Brechkraft der Hornhaut messen. Diese Technologie kann auch mit der Placido-Technologie kombiniert werden. Durch das „epithelial mapping“ ist es möglich, zwischen stromalem und epithelalem irregulärem Astigmatismus zu unterscheiden.(3)

Die Okuläre-Wellenfrontanalyse ermöglicht die Messung des gesamten regulären und irregulären optischen Astigmatismus. Diese Technologie erfasst Licht, das in das Auge ein- oder austritt, und berechnet mithilfe von bis zu 1300 optischen Spiegeln die resultierende Wellenfront. Aberrationen niedriger Ordnung werden im Zernike-Polynom als Sphäre und Astigmatismus beschrieben (Aberrationen 1. und 2. Ordnung). Ein irregulärer Astigmatismus führt zu Aberrationen höherer Ordnung.(3)

### **3 Katarakt**

Katarakt, auch Grauer Star genannt, ist eine Erkrankung der Augenlinse, die durch zunehmende Trübung zu Sehbeeinträchtigung führt. Als Folge können verzerrtes oder verschwommenes Sehen, sowie Blendungsprobleme auftreten. In fortgeschrittenen Stadien kann diese Erkrankung zur Erblindung führen. Der Graue Star ist weltweit eine der Hauptursachen für Erblindung (28).

### 3.1 Risikofaktoren

Neben dem zunehmenden Alter als Risikofaktor haben Frauen eine höhere Prävalenz für Katarakte. (29) Weiters stellen auch ein geringes Einkommen und niedriger sozialer Status Risikofaktoren für Katarakt dar. (30,31)

Metabolische Erkrankungen spielen eine wichtige Rolle als Risikofaktor, so wird bei Patient\*innen mit Diabetes Mellitus Typ 2 etwa doppelt so häufig ein Katarakt festgestellt, als im Vergleich zur gesunden Vergleichspopulation. (31,32)

### 3.2 Pathogenese

Die Linse des menschlichen Auges wächst im Laufe des Lebens kontinuierlich, im Gegensatz zu anderen Epithelien kann sie abgestorbene Zellen nicht abtransportieren, stattdessen werden die Zellen mit der Zeit im Zentrum der Linse komprimiert. Ab der vierten Lebensdekade beginnt der Linsenkern schließlich in Kombination mit den kumulierten oxidativen Einflüssen an Transparenz zu verlieren. (32)

### 3.3 Einteilung

Die Einteilung kann nach verschiedenen Systemen erfolgen:

- Zeitlich nach dem Auftreten (kongenital, postnatal, juvenil, senil)
- Anatomisch (nukleär, kortikal, subkapsulär)
- Ausmaß (beginnend, reif)

#### 3.3.1 Ätiologisch Anatomische Einteilung

Die Anatomische Einteilung wird an der Spaltlampe folgendermaßen beurteilt:

**Cataracta nuclearis** – Kerntrübung: Durch Zunahme der Linsenfasern kommt es zu einer Linsenmyopie, wodurch für kurze Zeit das Lesen ohne Brille wieder möglich wird. Zusätzlich kann es zu Doppelbildern kommen.

**Cataracta corticalis** – Rindentrübung: Ist charakterisiert durch keilförmige Trübungen entlang der Linsenfasern.

**Cataracta subcapsularis** – Hintere Schalen­trübung: Metabolische Erkrankungen oder langzeit Kortisontherapien führen oft zu dieser Form der Trübung. Es kommt zur Störung der Umwandlung der Linsenfasern aus der äquatorialen Zone.

**Cataracta coronaria** – Kranzstar: Ist eine kranzförmige Rindentrübung.

**Cataracta coerulea**: Kranzförmige aquamarine Trübung

**Christbaumschmuckkatarakt**: Bunt schillernde kristalline Eintrübungen aufgrund von Cholesterinkristallen

### 3.3.2 Entwicklungsstadien

**Cataracta incipiens**: Beginnende Trübung einzelner Schichten.

**Cataracta provecta**: Fortgeschrittene Linsentrübung mit Indikation zur Operation.

**Cataracta intumescens**: Rasche Eintrübung durch Flüssigkeits- und Volumenzunahme im Rindenbereich. Hier besteht die Gefahr für ein phakolytisches Glaukom, falls Linsenproteine durch die Kapsel treten.

**Cataracta immatura**: Verschieden Linsentrübungen kombiniert.

**Cataracta matura**: Vollständige Trübung der Linse, die je nach Farbe anders benannt werden. Nivea – weiß, brunescens - braun, rubra - rot, nigra - schwarz. Bei der Cataracta nivea besteht durch den erhöhten intrakapsulären Druck eine erhöhte Gefahr des Einreißen der Kapsel während der Katarakt-Operation.

**Cataracta hypermatura (Cataracta Morgagni)**: Teilweise Verflüssigung und Absacken des Linsenmaterials. Hier ist ebenso das Risiko für ein phakolytisches Glaukom erhöht. (33)

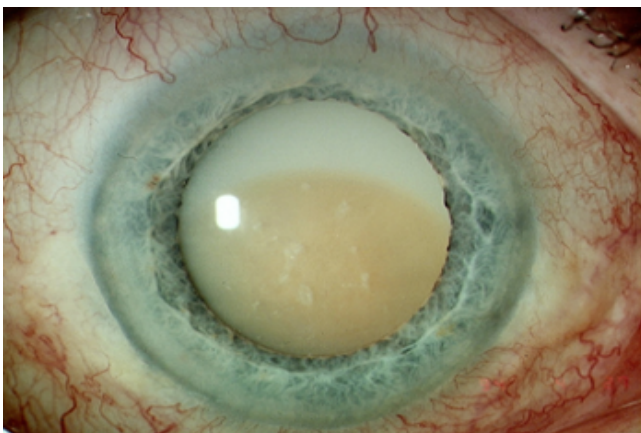
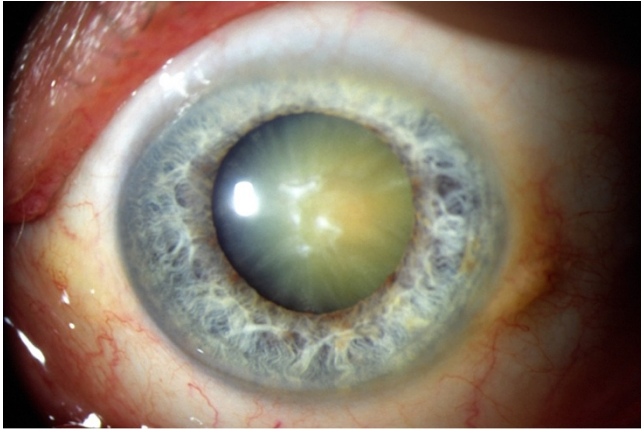
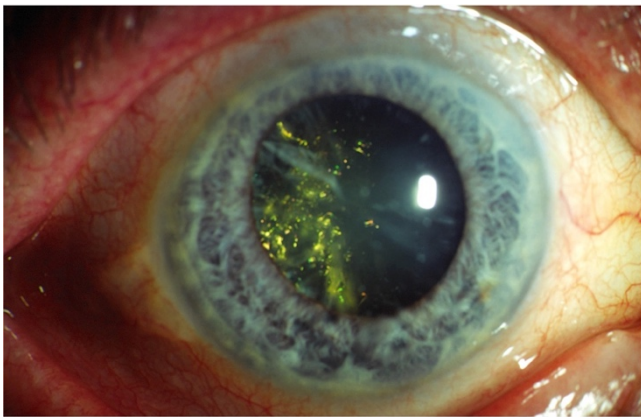


Abbildung 4 Cataracta Hyperamatura



*Abbildung 6 Cataracta Nuclearis*



*Abbildung 5 Christbaumschmuck-Katarakt*

### **3.3.3 Indikation für eine Operation**

Entscheidend für die Indikationsstellung einer Kataraktoperation ist die individuelle Beeinträchtigung der Patient\*innen. Die Indikation eines chirurgischen Eingriffs ist demnach gegeben, sobald es zu subjektiven Beeinträchtigungen der Fähigkeiten im täglichen Leben kommt. Eine Studie, in der das Risiko von Hüftfrakturen bei Patient\*innen verglichen wurde, ergab, dass Patient\*innen die sich einer Kataraktoperation unterzogen haben, etwa 16 Prozent weniger Hüftfrakturen erlitten als Patient\*innen ohne eine Kataraktoperation. (34,35)

## **3.4 Untersuchungen**

### **3.4.1 Sehschärfe -Visus**

Die Bestimmung der Sehschärfe ist interindividuell eine gut vergleichbare und reproduzierbare Methode. Es lassen sich folgende Arten unterscheiden:

- Erkennungssehschärfe – Visus
- Auflösungssehschärfe – Gitter Sehschärfe
- Lokalisationssehschärfe
- Punktsehschärfe
- Lesevermögen

#### **3.4.1.1 Angabe der Sehschärfe**

Die Sehschärfe wird als Dezimalvisus angegeben, welcher dem Kehrwert der Lücke des kleinsten erkennbaren Landoltrings gemessen in Winkelminuten entspricht. Er wird ohne Einheit mit einer, oder maximal zwei Kommastellen angegeben. Als Basiswert dient der Visus 1,0 , geringere Werte bedeuten schlechteres und höhere Werte ein besseres Sehvermögen.(36)

#### **3.4.1.2 logMAR- Visus:**

Dieser gibt den dekadischen Logarithmus des in Winkelminuten gemessenen kleinsten Auflösungsvermögen (MAR: Minimum angle of resolution) an. Dabei entspricht MAR dem Kehrwert des Dezimalvisus. (36)

#### **3.4.1.3 Fernvisus:**

In der Praxis bedient man sich der Erkennungssehschärfe. Der Visus ist definiert als Fähigkeit zwei dicht beieinanderliegende Punkte als getrennte Objekte identifizieren zu können. Optotypen oder auch Sehzeichen sind das Mittel der Wahl für die Bestimmung.(37)

#### **3.4.1.4 Nahvisus:**

Vom Fernvisus ist es aufgrund physiologischer Gegebenheiten schwer auf den Nahvisus rückzuschließen. Für flüssiges Lesen in der Nähe wird ein größeres Feld im zentralen Gesichtsfeld benötigt als beim Lesen in der Ferne.(38)

Um auch dort eine interindividuelle Vergleichbarkeit zu schaffen, gibt es vordefinierte Leseproben wie z.B. die Oculus Nahsehprobe, die Radner Lesetafel oder die Colenbrander und MNread- Chart ,welche diesen Standards entsprechen.

Zur Bestimmung der Lesefähigkeit wird die Anzahl der Wörter pro Minute von einem standardisierten Lesetext gelesen und ausgewertet. In der Praxis unterliegt das Erreichen einer gewissen Lesestufe meist dem subjektiven Ermessen des Untersuchers. Als nicht erreicht gilt, wenn der Textblock nicht innerhalb einer bestimmten Zeit (20 Sekunden) gelesen werden, oder der Satz inhaltlich nicht verstanden werden kann.(39,40)

### **3.4.2 Refraktionsbestimmung**

Eine Methode zur objektiven Bestimmung der Refraktion ist das Autorefraktometer. Dabei werden die Refraktionswerte über eine festgelegte Zone an der Pupillenfläche gemessen. Eine weitere Methode bietet die Skiaskopie, die vom Untersucher selbst gemessen wird. Hierbei können weitere Erkrankungen wie etwa Hornhautveränderungen erkannt werden. Die Skiaskopie gilt zudem als Goldstandard bei nicht kooperationsfähigen Patient\*innen, oder jenen, die nicht an einem Autorefraktometer positioniert werden können. Je nach Ausprägung der Irregularitäten können im Auge monochromatische Aberrationen entstehen. Da es bei den objektiv-optischen Refraktionsmessungen zu deutlichen Refraktionsunterschieden kommen kann, sollte im Anschluss eine subjektive Refraktionsbestimmung erfolgen. (39,40)

### **3.4.3 Aberrationen**

Aberrationen sind Abbildungsfehler, die aufgrund der Brechung an nicht ideal geformten oder nicht zentrierten Oberflächen auftreten können. Aberrationen einer bestimmten Wellenlänge werden auch als monochromatische Aberrationen bezeichnet. Diese werden in Aberrationen niedriger (LOA) sowie höherer Ordnung (HOA) unterteilt.(41)

#### **3.4.3.1 Aberrationen niedriger Ordnung**

Dazu gehört die Kurzsichtigkeit, die Weitsichtigkeit und der reguläre Astigmatismus. In der Wellenfrontanalyse erzeugt die Myopie einen positiven Defokus, die Hyperopie einen negativen Defokus und der Astigmatismus eine orthogonale/schräge Aberration. Aberrationen können mithilfe der Wellenfrontanalyse gemessen werden.(41,42)

### 3.4.3.2 Aberrationen hoher Ordnung

Die Pupillengröße, das Alter und einige Laserverfahren wie die Laser-in-situ-Keratomileusis (LASIK) sowie die radiale Keratotomie (RK) können das Auftreten von HOAs begünstigen.(42)

Aberrationen höherer Ordnung können durch Messung in drei Formen unterschieden werden.

- i. Sphärische Aberration: Periphere Strahlen werden entweder stärker oder schwächer als die zentralen Strahlen gebrochen. Dies tritt oft nach RK, LASIK oder nach Eingriffen an der Hornhautoberfläche auf und führen zu Halos.
- ii. Koma: Verwandelt ein Punktobjekt in eine kometenartige Streufigur mit einem scharfen Brennpunkt an einem Rand, der am gegenüberliegenden Rand des Strahls in einen unscharfen Brennpunkt übergeht. Häufig findet man dies bei Patient\*innen mit einem Hornhauttransplant, einem Keratokonus oder einer dezentraler Laseraberration in der Krankengeschichte.
- iii. Dreiblattfehler/Trefoil: Die Wellenfront sieht hierbei aus wie ein drei-blättriges Kleeblatt. Diese Form kann vor allem nach refraktiven Eingriffen auftreten.(41,42)

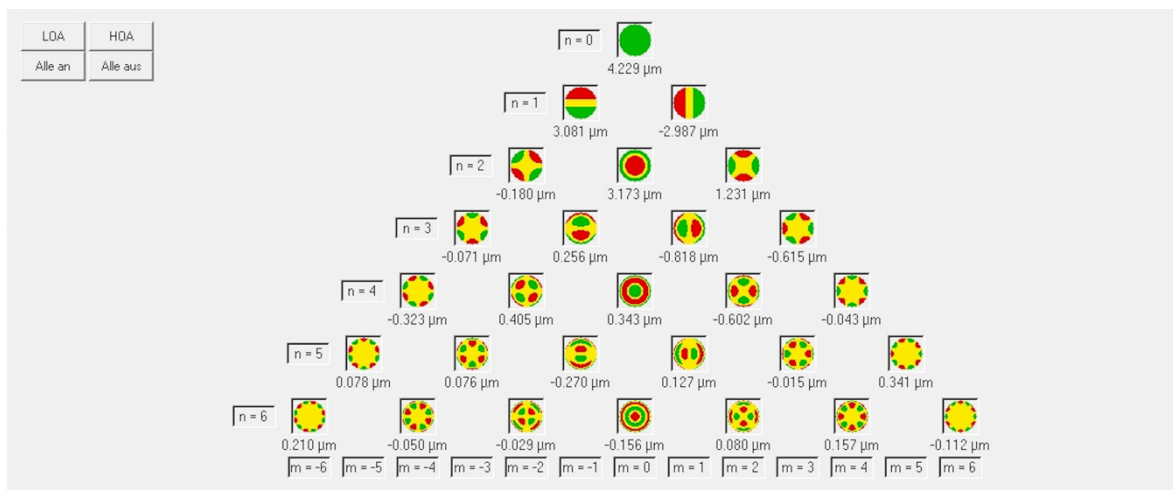


Abbildung 7 Zernike Polynome

## 3.5 Biometrie

Die biometrische Untersuchung dient der Erfassung von physikalischen Parametern. Durch Einsetzen dieser in die Intraokularlinsen-Formel kann die Stärke der IOL berechnet werden.

### **3.5.1 Axiale Bulbuslänge (AL)**

Die axiale Bulbuslänge beträgt im durchschnittlichen Auge eines Erwachsenen etwa 24mm. Sie kann mittels Kontakt-Ultraschall oder mithilfe eines Infrarot-Lasers bei der optischer Kohärenz-Biometrie gemessen werden.

### **3.5.2 Hornhautbrechkraft**

Für die Hornhautbrechkraft werden die Krümmungsradien der Hornhautoberflächen gemessen. Bei Patient\*innen mit Keratokonus ist die computerunterstützte Topografie der Hornhaut der Untersuchungsgoldstandard, da bei dieser Methode die Vorder- und Hinterfläche getrennt betrachtet werden kann.(43)

### **3.5.3 Vorderkammertiefe**

Die Vorderkammertiefe gilt als wichtige Variable bei der Berechnung der IOL sowie der Operationsplanung. Stark hyperope Augen besitzen meist eine flachere Vorderkammertiefe als emmetrope Augen. Somit kann bei etwaigen chirurgischen Interventionen weniger Platz vorhanden sein. (44,45)

### **3.5.4 White to white Abstand**

Der Weiß-zu-Weiß-Durchmesser (WTW) der Hornhaut ist der horizontale Abstand zwischen den Rändern des Limbus der Hornhaut. Dieser wird als Parameter für die Berechnung der IOL-Stärke benötigt. Zusätzlich besitzt dieser Wert bei der Diagnosestellung verschiedener Augenerkrankungen eine hohe Bedeutung und es wurde gezeigt, dass der WTW Abstand mit dem Linsendurchmesser korreliert.(46–48)

präoperative Daten:								<b>OD</b> rechts
AL: <b>23.10 mm</b>		Refraktion:						
D1: <b>40.44 dpt x 91°</b>		Visus:						
D2: <b>43.51 dpt x 1°</b>		Status: <b>phak</b>						
VKT: <b>2.71 mm</b>		Zielref.:						
<b>AcrySoft SN60AT</b>		<b>Corneal ACR6D SE</b>		<b>Corneal AJPR VKL (nO)</b>		<b>IDEA X-celens (nO)</b>		
A-Konst: 118.7		A-Konst: 120.5		A-Konst: 115.8		A-Konst: 119		
IOL (D)	REF (D)	IOL (D)	REF (D)	IOL (D)	REF (D)	IOL (D)	REF (D)	
24.5	-1.02	27.0	-0.88	21.0	-1.09	25.0	-1.08	
24.0	-0.65	26.5	-0.54	20.5	-0.67	24.5	-0.71	
23.5	-0.29	26.0	-0.21	20.0	-0.26	24.0	-0.36	
<b>23.0</b>	<b>0.07</b>	<b>25.5</b>	<b>0.12</b>	<b>19.5</b>	<b>0.15</b>	<b>23.5</b>	<b>0.00</b>	
22.5	-0.42	25.0	0.44	19.0	0.55	23.0	0.34	
22.0	0.77	24.5	0.76	18.5	0.95	22.5	0.69	
21.5	1.11	24.0	1.08	18.0	1.34	22.0	1.03	
Erme. IOL: 23.09		Erme. IOL: 25.68		Erme. IOL: 19.68		Erme. IOL: 23.49		

präoperative Daten:								<b>OS</b> links
AL: <b>23.40 mm</b>		Refraktion:						
D1: <b>41.19 dpt x 94°</b>		Visus:						
D2: <b>42.78 dpt x 4°</b>		Status: <b>phak</b>						
VKT: <b>2.80 mm</b>		Zielref.:						
<b>AcrySoft SN60AT</b>		<b>Corneal ACR6D SE</b>		<b>Corneal AJPR VKL (nO)</b>		<b>IDEA X-celens (nO)</b>		
A-Konst: 118.7		A-Konst: 120.5		A-Konst: 115.8		A-Konst: 119		
IOL (D)	REF (D)	IOL (D)	REF (D)	IOL (D)	REF (D)	IOL (D)	REF (D)	
23.5	-1.00	26.0	-0.94	20.5	-1.35	24.0	-1.07	
23.0	-0.64	25.5	-0.61	20.0	-0.94	23.5	-0.71	
22.5	-0.28	25.0	-0.28	19.5	-0.53	23.0	-0.36	
<b>22.0</b>	<b>0.07</b>	<b>24.5</b>	<b>0.05</b>	<b>19.0</b>	<b>-0.12</b>	<b>22.5</b>	<b>-0.01</b>	
21.5	0.42	24.0	0.37	18.5	0.28	22.0	0.34	
21.0	0.77	23.5	0.68	18.0	0.68	21.5	0.68	
20.5	1.11	23.0	1.00	17.5	1.07	21.0	1.02	
Erme. IOL: 22.10		Erme. IOL: 24.57		Erme. IOL: 18.85		Erme. IOL: 22.49		

Abbildung 8 Biometrische Untersuchung

### 3.6 Formeln für die Berechnung der Intraokularlinsenstärke

Bei den Formeln kann man zwischen Vergenz- Formel, Formel mit künstlicher Intelligenz, Strahlungs-Verfolgungsformel oder eine Kombination dieser vier Arten unterscheiden. Die häufigste heute verwendete Formel ist die Vergenz- Formel, die auf der Gaußschen Optik beruht. Mithilfe von biometrischen Daten wird die effektive Linsenposition (ELP) geschätzt, sowie die voraussichtliche Refraktion berechnet. Abhängig von der Formel werden unterschiedlich viele biometrisch gemessene Variablen benötigt.(49)

- i. SRK/T Sanders-Retzlaff-Kraff theoretical
- ii. Haigis
- iii. BUII (Barett Universal 2)

Formula	Ove rall	Short	Long	Axial length	Mean Kerato- metry	Anterior chamber depth	Lens thickness	Central cor- neal thick- ness	White to white corneal diam- eter
SKR/T	32	16	16	Yes	Yes	No	No	No	No
Haigis	26	17	16	Yes	Yes	Yes	No	No	No
Barret Uni- versal 2	23	11	12	Yes	Yes	Yes	Yes	No	Yes

*Tabelle 1 IOL-Formeln(49)*

### 3.7 Intraokularlinsen (IOL)

Die erste Implantation einer intraokularen Linse aus Plexiglas wurde von Sir Harold Ridley L. im Jahr 1949 in London durchgeführt. Er stellte fest, dass sich Plexiglas, also Polymethylmethacrylat (PMMA), bei verletzten PilotInnen im Auginneren innert verhält. (50–53)

Intraokularlinsen (IOL) werden aus einer zentralen Optik aufgebaut, die für die bildgebenden Eigenschaften verantwortlich ist, sowie den Haptiken welche der Befestigung der Linse im Auge dienen. Verschiedene intraokulare Strukturen wie der Kammerwinkel, die Regenbogenhaut und der Sulcus ciliaris wurden als Befestigungsorte ausprobiert. Gegenwärtig werden faltbare IOLs in der Regel in den Kapselsack implantiert. Faltlinsen werden entweder als ein- oder dreiteilige Modelle angeboten. Früher wurden einige dreiteilige IOL-Modelle entwickelt, um den unterschiedlichen Anforderungen an Material und Design von Optik und Haptik gerecht zu werden. Der Trend heutzutage geht jedoch dahin, einteilige Linsen zu verwenden.(33)

#### 3.7.1 Design

Die häufigste Ursache für eine postoperative Visusreduktion nach einem Jahr ist der Nachstar PCO (Posterior Capsula Opacification) mit einer Häufigkeit von 12%.(54) Dieser entsteht durch Migration und Proliferation der verbleibenden Linsenepithelzellen in den zentralen Bereich der hinteren Kapsel. Viele Jahre wurden hydrophile Optiken mit weichen Kanten eingesetzt, die häufiger PCO verursachen. Mit dem Einsatz von hydrophoben Linsen mit scharfen Kanten wurde die Tendenz für PCO verringert.(55)

Durch das Design von optischen Strukturen kann man durch Änderung der Beugung, der Brechung oder durch Kombination unterschiedlicher Oberflächenstrukturen mehrere Brennpunkte erreichen, die klare Abbildungen in verschiedenen Entfernungen erlauben.(56)

Extended Depth of Focus (EDOF) IOLs, torische IOLs und asphärische IOLs nutzen diese Eigenschaften zur Verbesserung der Sehqualität.(57–59)

### 3.7.1.1 Haptik Design

Die Anforderungen an die Form, die Größe und die Stabilität der Haptiken von künstlichen Linsen variieren je nach Fixierungsort. Die Befestigungsmethoden orientieren sich an der geometrischen Form und umfassen C-/J-/Z-Loop-Designs oder verschiedene Plattenhaptikvarianten. Aktuell sind die meisten kapselsackfixierten IOLs aus einem Stück und weisen C-Loops oder Plattenhaptiken mit scharfen Kanten auf.(33)

### 3.7.2 Material

Material	Faltbar/Nicht faltbar	Biokompatibilität	Vorteile	Nachteile
PMMA	Nicht faltbar	Geringe Akkommodation von Entzündungszellen  Hohe Rate an PCO	Niedrige Kosten  Hohe Sehqualität	5-6mm Inzision
PDMS	Faltbar	Geringe Akkommodation von Entzündungszellen  Fibrotische Veränderungen an der Linsenoberfläche	Kleine Inzision	Gewebsverletzungen beim Öffnen in der Kapsel  Trübungen nach Kontakt mit intravitrealer Luft
Hydrophiles Acryl	Faltbar	Geringe Akkommodation von Entzündungszellen  Hohe Rate an PCO-Kalzifikation	Leichte Handhabbarkeit	Limitation in der Formgestaltung  Langzeit Trübungen
Hydrophobes Acryl	Faltbar	Geringe Rate an PCO  Hohe Akkommodation von Entzündungszellen	Gute Sehqualität  Kompatibel mit scharfen Ecken Design	Klebrige Oberfläche

Tabelle 2 Eigenschaften von Linsenmaterialien (60)

Materialien für die ophthalmologische Anwendungen sollten gewisse grundlegende Anforderungen erfüllen, wie eine dauerhaft - optische Transparenz, eine hohe Auflösung, eine chemische Stabilität, eine hohe Histokompatibilität und Sterilisierbarkeit.(61)

Die erste Intraokularlinse wurde aus PMMA hergestellt. Inzwischen haben die IOLs den Übergang von starren Materialien zu faltbaren, weichen vollzogen. Die im Handel erhältlichen IOLs bestehen heute hauptsächlich aus verschiedenen Arten von Acryl.(62)

- Polymethylmethacrylat (PMMA): Material mit der längsten Nachbeobachtungszeit, heute weniger verwendet da hierbei große Schnitte benötigt werden.
- Polydimethylsiloxane (PDMS): Die erste Linse aus Silikon, die für faltbare IOL verwendet wurde. Das Material besitzt einen höheren refraktiven Index und ist somit dünner als PMMA.(61,63,64)
- Faltbare Acrylate: Heutzutage die am meisten benutzte IOL. Es wird zwischen hydrophoben Linsen mit einem Wassergehalt von etwa 0,5% - 1% und hydrophilen Linsen mit 18% - 38% Wasser unterschieden.(62,65)

### **3.7.3 Linsen Techniken**

#### **3.7.3.1 Monofokale IOL**

Diese ist das am häufigsten verwendete Modell mit einem einzigen Brennpunkt. Die Zielrefraktion kann entweder als emmetrope oder myope Zielrefraktion berechnet werden.

- Die emmetrope Zielrefraktion für die hohe Sehschärfe in der Ferne. Für die Nahsicht wird ein Hilfsmittel (Lesebrille/Gleitsichtbrille) benötigt.
- Die myope Zielrefraktion für eine hohe Sehschärfe in der Nähe. Für die Fernsicht wird ein Hilfsmittel benötigt.(66)

Kommt es zu einer Operation an beiden Augen, kann durch unterschiedliche Zielrefraktionen eine sogenannte Monovision erreicht werden. Bei dieser Technik wird das dominante Auge für die Ferne eingestellt, das nicht dominante Auge auf den Zwischen- und Nahbereich ausgerichtet. Auf diese Weise kann bei Patient\*innen eine Fern- und Nahsicht durch monofokale Intraokularlinsen erreicht werden. Diese Technik ist jedoch begrenzt und kann bei zu großen Differenzen zwischen den Korrekturen zu Anisometropie und in weiterer Folge zu Symptomen wie Kopfschmerzen führen.(67,68)

Aktuelle monofokale Intraokularlinsen variieren in ihrem optischen Design, in der Stärke, der sphärischen Aberration (SA), den spektralen Filtereigenschaften, der chromatischen Dispersion des Materials und den geometrischen Merkmalen. Die Höhe der SA ist wichtig, da

diese mit der SA der Hornhaut der Patient\*innen interagiert und die optische Auflösung sowie die Schärfentiefe beeinflusst.(1)

### 3.7.3.2 Multifokale IOLs

Multifokale IOLs bieten die Möglichkeit in der Ferne und der Nähe scharf eingestellt zu werden. Jedoch kann es zu Einschränkungen in der Abbildungsqualität, im Kontrastsehen, sowie zu vermehrten Blendungen und Doppelbildern kommen.(1)

Der Vorteil einer multifokalen IOL ist, dass Patient\*innen weniger auf eine Brille angewiesen sind.(69)

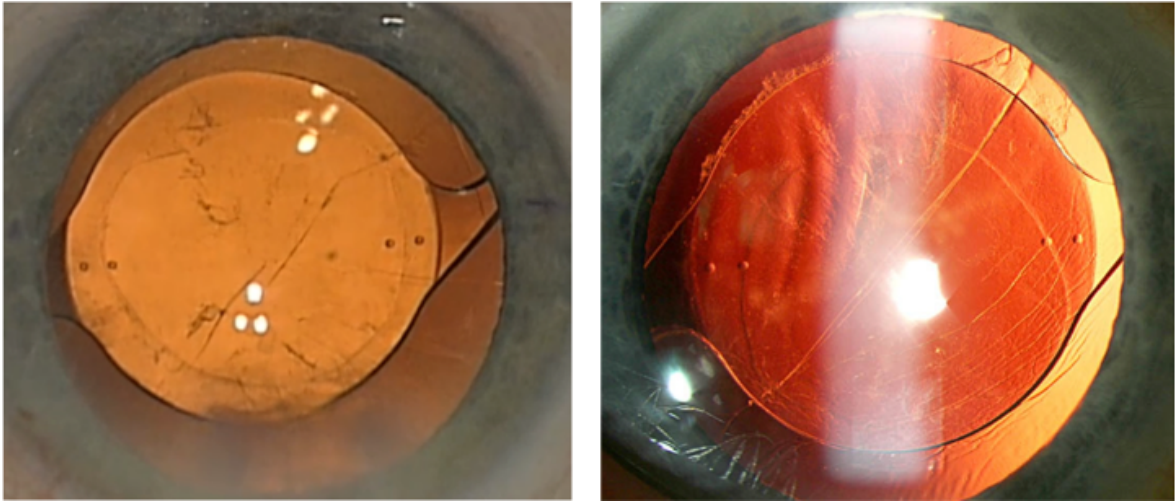


Abbildung 9 Multifokale Linse (Hoya Gemetric)

### 3.7.3.3 Torische IOLs

Torische Linsen werden zur Korrektur eines regelmäßigen Hornhautastigmatismus verwendet. Für die Auswahl der Linse ist die präoperative Berechnung des Gesamtastigmatismus der Hornhaut unerlässlich.(69)

Diese Linsen können neben der Sphäre auch bis zu drei Dioptrien an Astigmatismus korrigieren. Eine genaue Orientierung und Ausrichtung der Linse mittels Orientierungsmarken spielt eine entscheidende Bedeutung.(1)



*Abbildung 10 Torische Linsen in situ*

### **3.7.3.4 EDOF (Extended deep of focus)**

Die EDOF-Linsentechnologie wurde für die Behandlung von presbyopen Patient\*innen entwickelt, die für keine refraktive Laserchirurgie infrage kommen.(56)

Charakteristisch für diese IOL-Art ist, dass sie im Gegensatz zu multifokalen Intraokularlinsen (MF-IOLs) nur einen einzelnen verlängerten Brennpunkt erzeugen. Dadurch verbessert sich die Tiefenschärf, sowie die Mittel- und Nahsehleistung mit einer nur minimalen Beeinträchtigung der Fernsicht. Zudem sollten photische Phänomene, Blendungen und Lichthöfe reduziert werden und ein Halo Effekte nicht mehr vorkommen. Ist jedoch das Ausmaß der Aberration zu hoch, kann es zu Verschlechterungen der Bildqualität in der Ferne und zu dysphotischen Phänomenen kommen, weshalb sie oft mit anderen Linsentechniken kombiniert werden.(70–72)

<i>Type</i>	<i>IOL</i>	<i>Material</i>	<i>Design</i>	<i>Optik Größe</i>	<i>Overall Größe</i>
<b>Pure EDOF IOL</b>	<b>Spherical aberration-based EDOF IOLs</b>				
	SIFI mini Well Ready	Hydrophiles Acryl mit hydrophober Oberfläche	Closed Loop	6.0mm	10,75mm
	<b>EDOF IOLs utilising the pinhole effect</b>				
	IC-8	Hydrophiles Acryl	C-loop	6.0mm	12,5mm
	Xtrafocus Pinhole Implant	Hydrophobes Acryl	C-loop	6.0mm	14.0mm
<b>Hybrid MF/EDOF IOLs</b>					
	Tecnis Symphony ZXR00	Hydrophobes Acryl	C-loop	6.0mm	13.0mm

*Tabelle 3 IOL Eigenschaften(70)*

## **Prinzipien der EDOF IOL**

### **i. Sphärische Aberration (SA)**

Diese entsteht durch den Brennweitenunterschied der Lichtstrahlen, welche durch die Linse auf die Netzhaut treffen. Dieser Abbildungsfehler wird durch den Zernike-Koeffizienten beschrieben. SA können durch diese Linsen zu einem gewissen Maß neutralisiert werden.(70,73)

### **ii. Chromatische Aberration (CA)**

Chromatische Aberrationen entstehen durch die Dispersion unterschiedlicher Spektren des sichtbaren Lichts mit den jeweiligen Brennweitenspektren. Diffraktive Optiken vermindern die CA im Auge durch Achromatisierung und erhöhen dadurch die Kontrastsensitivität.(74,75)

### **iii. Pinhole-Effekt**

Durch die Verkleinerung der Pupillengröße kann das Licht aus der Pupillenmitte eine stärkere Reaktion der Photorezeptoren hervorrufen und somit die Tiefenschärfe verbessern.(76,76)

### 3.7.3.4.1 IC-8-IOL

Die IC-8-IOL ist eine sterile, einteilige, hydrophobe Acryl-Intraokularlinse mit einer zentralen Ringmaske aus Polyvinylidendifluorid. Sie basiert auf dem Konzept der Optik mit kleiner Apertur zur Verbesserung der Nahsicht. Sowohl Design und Material der IOL sind von der ASHF600-Monofokal-IOL inspiriert. Die IOL mit kleiner Apertur ist für die Implantation in den Kapselsack konzipiert. Sie hat eine modifizierte C-Haptik und einen Gesamtdurchmesser von 12,5 mm. Sie verfügt über eine bikonvexe asphärische Optik mit einem Durchmesser von 6,0 mm und einer quadratischen Hinterkante von 360 Grad. Die eingebettete ringförmige Maske hat einen Außendurchmesser von 3,23 mm mit einer zentralen Öffnung von 1,36 mm Durchmesser und enthält 3200 pseudozufällig angeordnete Mikroperforationen mit einem Durchmesser von 7 bis 10  $\mu\text{m}$ . Diese Mikroperforationen sollen das Falten der IOL unterstützen. Die IOL ist in verschiedenen Stärken von 15,5 bis 27,5 D erhältlich.(77)

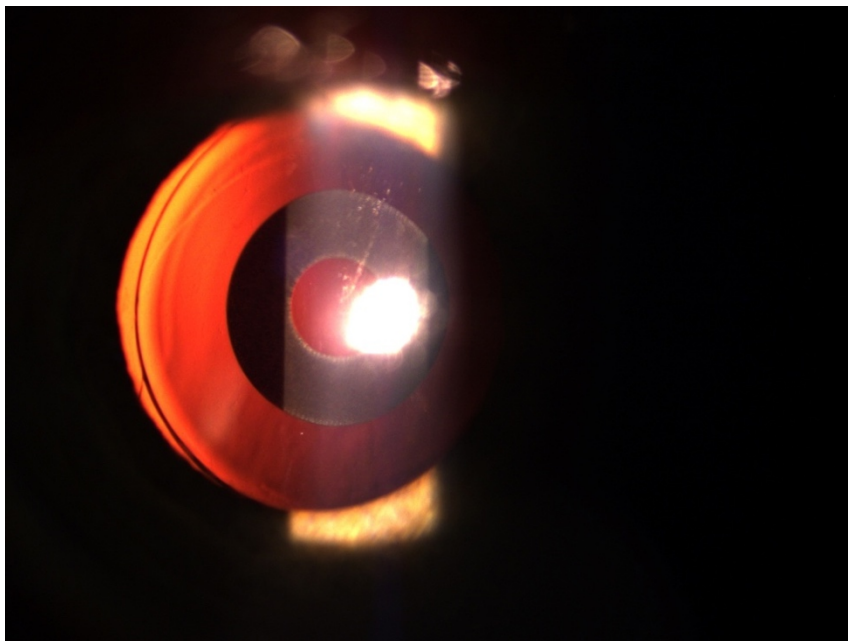


Abbildung 11 IC8-IOL

### 3.7.3.4.2 Xtrafocus IOL

Die XtraFocus ist eine ergänzende intraokulare Lochblende (IOPH) mit einer Okklusivmaske von 6,0 mm und einem zentralen Lochdurchmesser von 1,3 mm. Die Linse ist zur Huckepack-Implantation in den Sulcus ciliaris des pseudophaken Augen konzipiert und besitzt keine Brechkraft. Diese wird aus einem speziellen schwarzen, hydrophoben, faltbaren

Acryl hergestellt. Durch äußerst dünne und polierte Haptiken sollten jegliche Uveal-Reaktionen vermieden werden. Dieses Material ist undurchsichtig für sichtbares Licht, jedoch vollständig transparent im infraroten Lichtspektrum. Diese Eigenschaft ermöglicht die Untersuchung der Netzhaut mit infrarotbetriebenen Geräten wie die optischer Kohärenztomografie und das Rasterlaser-Ophthalmoskop.(78)

### **3.7.4 Untersuchungen**

#### **3.7.4.1 Hornhauttopografie**

Die Einführung der Hornhauttopografie hat dazu beigetragen, subtile Erscheinungsformen zu erkennen und somit frühere Diagnosen zu ermöglichen. Zu den wichtigsten topografischen Mustern, die bei unregelmäßiger Hornhaut gefunden werden, gehören asymmetrische Bowties mit oder ohne inferiore Steilheit und schiefe radiale Achsen. Die Hornhauttomografie ist eine weitere Form der Bildgebung, die auch die Messung der Hornhautdicke zusammen mit der lokalen Steilheit ermöglicht. Sobald die Diagnose gestellt ist, ist eine serielle Hornhauttopografie/-tomografie empfohlen, um das Fortschreiten der Erkrankung zu überwachen.(17,79)

## 4 Material und Methoden

Die Arbeit soll aufzeigen, ob durch die Implantation einer Linse mit Pinhole - Eigenschaften bei Patient\*innen mit irregulärer Hornhaut eine Sehleistung von 0,5 Dezimalen oder besser erreicht werden kann. Dafür wurde eine Literaturrecherche im Zeitraum von November 2023 bis Januar 2024 durchgeführt. Die Daten stammen aus verschiedenen Fachzeitschriften, Fachbüchern und Online-Datenbanken, wie PubMed und UpToDate. Für den Hauptteil der Arbeit wurde in der Datenbank PubMed eine Kombination aus den Stichwörtern: „pinhole lens“, „small aperture“, „irregular cornea“ gesucht. Hierauf folgen im Pubmed 398 Beiträge zu diesem Thema. Nach genauerer Durchsicht wurden 6 Arbeiten ausgewählt.

### 4.1 Einschlusskriterien und Studien TeilnehmerInnen

In den eingeschlossenen sechs Arbeiten wurden insgesamt 46 Augen von 43 Patient\*innen untersucht die entweder nur einseitig (ML - monolateral) oder beidseitig (BL - bilateral) eine Linse mit „pinhole“ Effekt (IC-8, Xtrafocus) implantiert bekamen. Bei drei der Arbeiten handelt es sich um Case Reports (Arbeit 4,5,6). Weiters verwendet wurden eine prospektive nicht-randomisierte interventionelle Fallserie (Arbeit 1), eine Subanalyse einer prospektiven Fallserie (Arbeit-2) und eine deskriptive, retrospektive Kohortenstudie (Arbeit 3)

<i>Linsen</i>	<i>Shajari et al 2020</i>	<i>Lang et al 2021</i>	<i>Franco et al 2022</i>	<i>Schultz et al</i>	<i>Trindade et al</i>	<i>Hyeck-Soo Son et al</i>	<b>Gesamt</b>
IC-8 Acu Focus	17	17	9	1	X	X	44
Xtra Focus	X	X	X	X	1	1	2

*Tabelle 4 Verwendete Pinhole-Linsen Modelle*

### 4.2 Einzelanalysen der Studien

Im folgenden Teil werden die Ein- und Ausschlusskriterien sowie die Voruntersuchungen, die Ziele sowie die Auswahl der Augen der ausgewählten Arbeiten im Einzelnen erläutert. Im Falle der Case Reports wird der Fall vorgestellt.

## **4.2.1 Arbeit I- Safety and efficacy of a small-aperture capsular bag–fixated intraocular lens in eyes with severe corneal irregularities, Mehdi Shajari et al. (80)**

### **4.2.1.1 Ein- und Ausschlusskriterien**

In der prospektiven Fallserie von Shajari et al. (2020) wiesen alle 17 Patient\*innen schwere Hornhautunregelmäßigkeiten mit einer durchschnittlichen gesamt HOA (higher-order aberrations) von  $0,75 \mu\text{m}$  auf. Diese entstanden nach vorangegangenen perforierenden Keratoplastiken (PK) (vier Augen), eines fortgeschrittenen Keratokonus (acht Augen), sowie einer Ektasie nach radialer Keratotomie (RK) und aufgrund von Hornhautnarben (drei Augen). Patient\*innen wurden ausgeschlossen, wenn diese unter folgenden Krankheiten litten: fortschreitender Keratokonus, Pseudoexfoliation oder instabile zonuläre Fasern, Glaukom, Makulopathie, reduzierte Endothelzellen ( $<1800$  Zellen/ $\text{mm}^2$ ), zentrale Hornhauttrübung. Sowie wenn die IOL-Operation unter lokaler Anästhesie nicht durchführbar war.

### **4.2.1.2 Voruntersuchungen, Zielrefraktion und Auswahl der Augen**

Vor der Operation wurden Untersuchungen durchgeführt, darunter eine Spaltlampenuntersuchung, eine Fundoskopie, eine Tonometrie, eine Überprüfung der Sehschärfe, eine Biometrie (mit dem IOL Master 700 von Carl Zeiss Meditec AG), ein Makula-OCT (mit dem Spectralis von Heidelberg Engineering GmbH) und eine Hornhauttomografie (mittels Pentacam von OCULUS Optikgeräte GmbH). Um mögliche Verfälschungen der Ergebnisse zu vermeiden, wurde das Tragen harter Kontaktlinsen eine Woche vor den Untersuchungen pausiert.

Wenn beide Augen eine IOL benötigten, wurde die IC-8 Linse in dem Auge mit der stärkeren Unregelmäßigkeit implantiert. Emmetropie wurde als Zielrefraktion festgelegt. Für die Berechnung der IOL-Stärke wurde die Haigis 5-Formel verwendet. Zusätzlich verglich Shajari et al. die Ergebnisse mit der SRK/T 6 und der Barrett Universal II-Formel. Falls alle drei Berechnungen ein hyperopes Ergebnis ergaben, wurde die Stärke der Linse auf eine myope Refraktion eingestellt. Dies wurde bei 7 Augen angewandt.

## **4.2.2 Arbeit II Predictability of Refractive Outcome of a Small-Aperture Intraocular Lens in Eyes with Irregular Corneal Astigmatism, Julian Langer et al. (81)**

### **4.2.2.1 Ein- und Ausschlusskriterien**

Die prospektive Fallserie von Langer et al. untersuchte 17 Augen von 17 Patient\*innen die unter schweren Hornhautunregelmäßigkeiten mit einer durchschnittlichen Gesamtabweichung höher Ordnung im Quadrat von  $0,75 \pm 0,91 \mu\text{m}$  litten.

Bei den eingeschlossenen Augen handelt es sich um vier Augen status-post perforierender Keratoplastik, acht Augen mit fortschreitendem Keratokonus, drei Augen mit Ektasie nach Radialer Keratotomie, und zwei Augen mit Hornhautnarben.

Ausgeschlossen wurden Patient\*innen, wenn diese unter folgenden Krankheiten litten: Pseudoexfoliationen, instabilen Zonulafasern, fortschreitendem Keratokonus, Makulapathologie, reduzierte Endothelzellen ( $< 1,800 \text{ cells/mm}^2$ ), Glaukom, zentrale Hornhauttrübung und mangelnde Compliance.

### **4.2.2.2 Voruntersuchungen, Zielrefraktion und Auswahl der Augen**

Im Falle einer bilateralen Operation wurde das Auge mit den stärkeren Unregelmäßigkeiten ausgewählt.

Präoperativ und postoperativ am Tag eins, in Woche eins und in Monat drei wurde eine Spaltlampenuntersuchung, eine Fundoskopie sowie eine Tonometrie durchgeführt. Zudem wurde der korrigierte (CDVA) und der unkorrigierte (UDVA) Fernvisus (auf 4 m), der unkorrigierte Intermediärvisus (UIVA 80 cm) und der unkorrigierte Nahvisus (UNVA 40 cm) mit einer Kontrasttafel der Early Treatment of Diabetic Retinopathy Study (ETDRS) unter photopischen Lichtbedingungen ( $167 \text{ cd/m}^2$ ) präoperativ und drei Monate postoperativ in logMAR gemessen.

Zusätzlich wurden die Patient\*innen mit der Scheimpflug-Kornealtomografie und der optischen Kohärenztomografie untersucht. Harte Kontaktlinsen wurden etwa eine Woche vor den Untersuchungen nicht mehr getragen. Die Berechnung der Intraokularlinsen-Brechkraft erfolgte für alle Patient\*innen anhand der biometrischen Formeln der vierten Generation

(Haigis, SRK/T und Barrett Universal II) sowie mithilfe des OKULIX Ray-Tracing (Tomey) mit einer auf Emmetropie eingestellten Zielrefraktion.

Bei den IOL-Berechnungen wurde eine leichte Myopie angestrebt, primär wurde mit der Haigis-Formel berechnet und die Ergebnisse mit denen der SRK/T- und Barrett Universal II-Formeln verglichen. Die biometrischen Daten, wurden aus dem IOL Master 700 importiert. Ein konstanter Pupillendurchmesser von 2,5 mm wurde für alle Patient\*innen gewählt.

### **4.2.3 Arbeit III Implantation of a Small Aperture Intraocular Lens in Eyes with Irregular Corneas and Higher Order Aberrations, Fabrizio Franco et al.(82)**

#### **4.2.3.1 Ein- und Ausschlusskriterien**

Franco et al. berichtet in seiner Arbeit von neun Patient\*innen mit HOAs. In der deskriptiven Kohortenstudie wurden Patient\*innen mit unterschiedlichen HH-Unregelmäßigkeiten eingeschlossen. 78 % der eingeschlossenen Patient\*innen hatten die irreguläre HH aufgrund einer radialen Keratotomie. 11 % eine dezentrale refraktive Operation mit geringer Hornhautrestdicke und 11 % eine Pterygiektomie mit verbleibenden Unregelmäßigkeiten an der Vorder- und Hinterseite der HH. Hier wurden präoperativ die HOAs erfasst. Sechs Augen zeigten einen Haupt-HOA-Koma Form (Mittelwert 1,13  $\mu\text{m}$ ), zwei ein vierblättriges Kleeblatt Form (Mittelwert 1,41  $\mu\text{m}$ ) und ein Patient ein Klee-Form (Mittelwert 0,9  $\mu\text{m}$ ). Glaukomatöse Neuropathie und Makulopathien waren die Ausschlusskriterien in dieser Studie.

#### **4.2.3.2 Voruntersuchungen, Zielrefraktion und Auswahl der Augen**

In der deskriptiven, retrospektiven Studie von Franco et al. erhielten die Patient\*innen vorab sowie als Teil der Follow-up-Untersuchungen umfassende Messungen in den Bereichen der Sehschärfe, eine Biomikroskopie, eine Tonometrie, eine Hornhauttopografie, ein Vorderabschnitt-OCT, eine Aberrometrie und eine Gesichtsfelduntersuchung. Zusätzlich wurde mit Hilfe einer Simulation eine Aberrationsindex-Punkteverteilungsfunktion für die Änderung des Strehl Verhältnisses bei entsprechender Pupillengröße durchgeführt. Diese zeigte bei allen Teilnehmer\*innen Vorteile durch die Reduktion der visuellen Aberrationen aufgrund der kleineren Pupillengrößen. Es wurden keine Angaben zur Berechnung der IOL-Stärke beschrieben.

#### **4.2.4 Arbeit IV Small-Aperture Intraocular Lens Implantation in a Patient with an Irregular Cornea, Tim Schultz et al. (83)**

##### **4.2.4.1 Zusammenfassung – IV - Case Report**

In diesem Case Report handelt es sich um einen 17-jährigen Patienten nach Hornhaut Trauma am rechten Auge mit parazentraler Hornhautperforation, einen Linsenkapseldefekt und einen Irisdefekt. Es wurde eine Linsenentfernung, eine vordere Vitrektomie sowie eine Hornhautnaht durchgeführt. Infolge litt der Patient an Aphakie, Dysphotopsie und photopischen Phänomenen sowie einem Verlust der Akkommodation mit einer CDVA von 0,2 (0,7 Log MAR) bei +18,00 Dioptrien (D) sphärischer Korrektur.

##### **4.2.4.2 Voruntersuchungen, Zielrefraktion und Auswahl der Augen**

Sechs Monate nach dem Trauma wurde die Implantation einer IC-8 Linse am rechten Auge geplant. Es zeigte sich in der Spaltlampenuntersuchung ein aphakes Auge mit einer großen, paarzentralen Hornhautnarbe sowie eine unregelmäßige Pupille mit variablem Durchmesser. In der Scheimpflug Tomografie zeigte sich ein regulärer Astigmatismus von 1,4 D am rechten Auge.

#### **4.2.5 Arbeit -V Toric intraocular lens combined with a supplementary pinhole implant to treat irregular corneal astigmatism, Bruno L.C. Trindade et al. (84)**

##### **4.2.5.1 Zusammenfassung- V - Case Report**

Der Case Report von Trindade et al. handelt von einem 41-jährigen Patienten, der beidseits an einem Keratokonus mit verminderter Sehschärfe leidet. Nach vorangegangenem Cross Linking sowie dem Einsetzen von intrakornealen Ringsegmenten am rechten Auge war der Patient dennoch auf das Tragen von Kontaktlinsen angewiesen. Aufgrund rezidivierender Konjunktividen war der Patient schließlich nicht mehr in der Lage die Kontaktlinsen zu tragen. Wegen einer Aniseikonie am rechten Auge konnte der Patient auch keine Brille tragen. Es wurde ein Linsenaustausch in Verbindung mit einer monofokalen IOL und einer Pinhole Linsen in den Sulcus Ciliaris empfohlen.

#### **4.2.5.2 Voruntersuchungen, Zielrefraktion**

In der Hornhauttomografie (Pentacam HR, Oculus) zeigte sich ein Keratokonus Stadium 2 nach der Amlser-Krumreich-Skala. Die Spaltlampenuntersuchung zeigte klare Hornhäute mit zwei intrakornealen Ringsegmenten im hinteren Drittel des Stromas des rechten Auges. Die UDVA betrug 20/800 / 1,6 log MAR am rechten Auge und 20/400 / 1.3 logMAR am linken Auge. Die CDVA am rechten Auge war 20/50 / 0,4 logMAR mit +1,00 -6,00 × 75 und 20/50 / 0,4 logMAR am linken Auge mit -1,50 -6,00 × 10.

Es wurde ein Linsenaustausch mit einer monofokalen Linse zusammen mit einer Pinhole Linse (Xtrafocus) im sulcus ciliaris durchgeführt. 4 Monate nach der ersten Operation wurde die monofokale Linse durch eine hochzylindrische torische IOL ausgetauscht.

#### **4.2.6 Arbeit - VI A pinhole implant to correct postoperative residual refractive error in an RK cataract patient, Hyeck-Soo Son et al.(85)**

##### **4.2.6.1 Zusammenfassung – VI - Case Report**

Der Case-Report von Hyeck Soo Son et al. berichtet von einem 66-jährigen Patienten mit zunehmender Sehverschlechterung, der sich vor 22 Jahren (1998) einer radialen Keratotomie unterzog und sich nun zu einer beidseitige Kataraktoperation vorstellt. Nach der Kataraktoperationen litt der Patient an schwankenden Refraktionen auf beiden Augen. Zur Korrektur dieser, wurde ihm ein ergänzendes Pinhole-Sulcus Implantat mit einer Xtrafocus in das rechte Auge implantiert.

##### **4.2.6.2 Voruntersuchungen, Zielrefraktion**

Bei der Voruntersuchung unter der Spaltlampe sah man die acht radiären Hornhauteinschnitte sowie einen kortikonukleären Katarakt. Die topografische Untersuchung mit einer Pentacam zeigte eine zentrale Abflachung der Hornhaut beidseits. Die Sehkraft (UDVA) am rechten Auge betrug 0,6 logMAR. Am linken Auge betrug die Sehkraft (UDVA) 1,7 logMAR.

Zur Berechnung der Linsenstärke wurde der ASCRS IOL Calculator (Version 4.8) für Post-RK-Augen verwendet. Es wurde eine monofokale Linse von TECNIS ® implantiert. Rechts mit einer Stärke von 29,0 D (Zielrefraktion +0,18D) und am linken Auge 29,0 (-0,32 D).

## **5 Ergebnisse**

In allen sechs eingeschlossenen Arbeiten konnte eine postoperative Verbesserung der Sehleistung von mindestens 0,5 Dezimalen / 0,3logMAR bei den Patient\*innen beobachtet werden.

Studien	Pinhole Linsen	Augen / Seite	Monolaterale Gruppe				Bilaterale Gruppe			
			BVCA/CDVA MO	UDVA MO	UIVA MO	UNVA MO	BVCA/CDVA BO	UDVA BO	UIVA BO	UNVA BO
Shajari et al. 2020	IC-8 Acu Focus	17ML	0,19 ± 0,06 log-MAR	0,19 logMAR	0,62 logMAR	0,45 logMAR	X	x	X	X
Lang et al 2021	IC-8 Acu Focus	17ML	0,19±0,06 log MAR	X	X	X	X	X	X	x
Franco et al. 2020	IC-8 Acu Focus	6ML / 3BL	0,20±0,15 log-MAR	X	X	X	0,20±0,15 log-MAR	X	X	X
Schultz et al 2016	IC-8 Acu Focus	1 ML	0 log MAR	0,1 logMAR	X	0,1 log MAR	X	X	X	x
Trindade et al 2020	XtraFocus	1 ML	X	0 log MAR	X	X	X	X	X	X
Hyeck Soo Son et al 2020	XtraFocus	1ML	X	-0,4 log MAR	X	X	X	X	X	X

Tabelle 5 Ergebnisse der Visuellen Sehleistungen nach Implantation einer Linse mit Pinhole Effekt Die Sehleistungen werden in verschiedenen Maßeinheiten angegeben.

*BCVA Best Corrected Visual Acuity- Best Korrigierter Visus*

*CDVA:Corrected Distance Visual Acuity- Korrigierter Fernvisus*

*UDVA: Uncorrected Distance Visual Acuity- Unkorrigierter Fernvisus*

*UIVA: Uncorrected Intermediate Visual Acuity- Unkorrigierter Intermediärvisus*

*UNVA: Uncorrected Near Visual Acuity- Unkorrigierter Nahvisus*

#### **5.1.1.1.1 Ergebnisse der Arbeit I**

Kein Auge zeigte in der Arbeit von Shajari et al. postoperativ eine schlechtere DCVA, UDVA, UIVA, oder UNVA als vor der Operation. Drei Monate nach der Operation zeigte sich eine signifikante Verbesserung der UDVA, UIVA, UNVA im Vergleich zu den präoperativen Werten. Bei 16 ( 94%) der 17 Augen war der CDVA postoperativ höher.

Ein Fragebogen über die visuelle Funktionsfähigkeit der Patient\*innen ergab eine signifikante Verbesserung bei Aktivitäten wie Lesen von Straßenschildern, von Geschäftsnamen, von Zeitungen oder das Steigen von Treppen bei schwachem Licht. Auch in der Defokussierungskurve verbesserte sich die Sehschärfe in jedem Punkt.

#### **5.1.1.1.2 Ergebnisse der Arbeit II**

17 Patient\*innen davon fünf rechte Augen, 12 linke Augen (Alter:  $54 \pm 7,9$  Jahre, neun Frauen, acht Männer) erhielten eine IOL mit kleiner Öffnung und einer Linsenstärke von  $20,5 \pm 2,25$  D (Bereich: 15,50 bis 26,50 D).

Drei Monate nach der Operation zeigte sich eine signifikante, durchschnittliche CDVA-Verbesserung von  $0,37 \pm 0,09$  auf  $0,19 \pm 0,06$  logMAR. Auch der UDVA, die UIVA und die UNVA verbesserten sich signifikant nach drei Monaten. In der Defokuskurve konnte man eine Verbesserung in jedem Punkt beobachten. Die Berechnungen der IOL war mit den Formeln SRK/T in vier Fällen, mit Haigis in zwei Fällen und mit Barrett Universal II in acht Fällen nicht möglich. Bei der OKULIX Ray- Tracing Methode konnte jedes Auge berechnet werden. Der absolute Fehler lag bei SRK/T bei  $0,59 \pm 0,35$  D, bei Haigis bei  $0,49 \pm 0,25$  D, bei Barrett Universal II  $0,67 \pm 0,28$  D und bei OKULIX Ray-Tracing  $1,64 \pm 4,00$  D.

#### **5.1.1.1.3 Ergebnisse der Arbeit III**

Francos topografische Studie zeigt durch die prä- und postoperative Untersuchung der HOAs, dass durch die Verkleinerung des Pupillendurchmessers sowie die Veränderung des Strehl-Verhältnisses durch die verkleinerte Öffnung der Linse mit dem Pinhole-Effekt eine Verbesserung der Sehqualität durch eine Verminderung der HOAs erreicht werden kann. Präoperativ wurde rechnerisch simuliert, dass sich der PSF (Point Spread Function) durch eine Verkleinerung des Pupillendurchmessers verbessert. Dies wurde auch postoperativ bestätigt. Die BCVA stieg von einem präoperativen Mittelwert von log MAR 0.32 ( $\pm 0,17$ ) auf 0,26 ( $\pm 0,30$ ) am Tag 7, auf 0,22 ( $\pm 0,20$ ) im Monat 1 und auf 0,20 ( $\pm 0,15$ ) im Monat 3. Bei

den Nachuntersuchungen wurde die Einsehbarkeit des hinteren Segmentes überprüft. Die periphere Netzhaut konnte immer mit einer Volkart Linse beurteilt werden. Auch andere Untersuchungen wie OCT, Fundus Fotografie und Perimetrie konnten bei der IC-8 Linse ohne Probleme durchgeführt werden. Der Vergleich der prä- und postoperativen Gesichtsfelduntersuchungen nach Humphrey 30:2 und des Ganzfeld-Screening-Tests mit 120 Punkten zeigte ebenfalls eine gute subjektive Anpassung, ohne Einschränkungen des Gesichtsfelds.(82)

#### **5.1.1.1.4 Ergebnisse der Arbeit IV**

6 Monate nach der Operation betrug die unkorrigierte Sehschärfe (UDVA, UNVA) des Patienten am rechten Auge für die UDVA 0,8 in der Ferne und für die UNVA 0,8 in der Nähe (0,1 log MAR). Mithilfe einer leichten Korrektur von +0,50 -0,50 × 045° konnte eine Fernsicht von 1,0 (0 log MAR) erreicht werden. In der Fundusuntersuchung zeigte der Patient keine Anomalien. Es wurden keine Gesichtsfelddefekte festgestellt. In einem Fragebogen berichtet der Patient von einer minimalen Blendung und Lichtempfindlichkeit bei Dämmerung.

#### **5.1.1.1.5 Ergebnisse der Arbeit V**

Zwei Wochen nach der ersten Operation verbesserte sich die UDVA auf 20/80 (0,6 logMAR), die CDVA auf 20/30 (0,2 logMAR). Nach 4 Monaten betrug die UDVA 20/60(0,5 logMAR), die BCDVA 20/20(0 logMAR).

Aufgrund der Aniseikonie sowie Problemen bei der Nahsicht, wurde eine zweite Operation zum Austausch der monofokalen Linsen durch eine hochzylindrische torischen IOL durchgeführt.

Am Folgetag der Operation berichtete der Patient über eine Verbesserung des Sehvermögens. Die unkorrigierte Sehschärfe betrug am Folgetag der Operation 20/16 / (-0,1logMAR). Die Kontrolluntersuchung in der Woche darauf zeigte eine gute Zentrierung der Implantate. Auch die Infrarotuntersuchung unter der Spaltlampe zeigte eine korrekte Positionierung der Markierungen der torischen Linse. Neun Monate nach der Operation wurde der Patient mit einem YAG-Laser aufgrund von Trübungen behandelt. Nach dem Eingriff zeigte er ein UDVA von 20/20 / (0 logMAR).

#### **5.1.1.1.6 Ergebnisse der Arbeit VI**

Vier Monate nach der Operation berichtet der Patient an beiden Augen über eine schwankend subjektive manifeste Refraktion (MR). Die UDVA am rechten Auge betrug 0,34 und die am linken Auge 0,38.

Da keine stabile Refraktion erhoben werden konnte, sah man von der Implantation einer monofokalen oder torischen Zusatzlinse ab. Die Wahl der Linse fiel auf eine sulkusfixierte Pinhole Linse (Xtrafocus) am rechten Auge, da man für diese keine stabile MR benötigt. Drei Monate nach der Implantation verbesserte sich die UDVA am rechten Auge auf -0,04logMAR und es kam zu einer verbesserten Tiefenschärfe. Mit diesen Werten zeigte sich der Patient zufrieden, sodass er auf die Implantation am zweiten Auge verzichtete.

## 6 Diskussion

Nach wie vor ist die genaue Berechnung des postoperativen, refraktiven Ergebnis eine Herausforderung bei irregulärer Hornhaut. Die meistverwendete Methode bedient sich einer biometrischen Formel der vierten Generation, welche das Gaußsche Optik Model „Der dünnen Linse“ als Näherungsrechnung und die Vorderflächen-Keratometrie miteinbezieht. (86)

Eine zweite, aufwendige und individuelle Methode ist das Ray Tracing. Diese Methode simuliert das Auge, indem es die Brechung der einzelnen Lichtstrahlen an den verschiedenen Grenzflächen des Auges erfasst und diese realitätsnah nachbildet. Die IOL-Stärke wird mithilfe eines Algorithmus berechnet, der das Snellen Gesetz, die Neigung der vorderen und hinteren Hornhautfläche sowie die verschiedenen Brechungsindizes der Medien am Auge berücksichtigt.(87–89)

In der Studie von Langer et al. ergab die OKULIX Ray Tracing Methode zur Berechnung der IOL-Stärke bei irregulären Hornhäuten mit hohen keratometrischen Werten ungenauere Ergebnisse als die biometrischen Formeln. Dies erscheint überraschend da vorherige Studien gezeigt haben, dass durch die Berechnung mithilfe der Ray Tracing Methode bei Augen status-post Refraktiven Eingriffen, wie Laser-in-situ-Keratomileusis eine postoperative hyperope Verschiebung, vermieden werden kann.(90,91)

Generell kommt es bei irregulären Hornhäuten in der Biometrie tendenziell zu einer Überschätzung der Hornhautbrechkraft. Daraus folgt eine Unterschätzung der IOL-Stärke, was zu einer postoperativen hyperopen Refraktionsfehler führt. Watson et al. hat in seiner Arbeit über Kataraktoperationen bei Keratokonuspatient\*innen die Auswirkung der Keratometrie auf den biometrischen Vorhersagefehler untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass bei mildem bis moderatem Keratokonus die tatsächlich gemessenen biometrischen Daten zur Berechnung der IOL zu besseren Ergebnissen führen, wobei bei schweren Keratokonus- Fällen standardisierte Werte zur Berechnung der IOL bessere Ergebnisse erzielen.(92) Seitens der Autoren wird bei Augen über 48,00 D zu erhöhter Vorsicht bei der Berechnung keratometrischer Werte geraten.(81) Bei Keratokonus im Stadium I und II nach Krumreich zeigte sich die SRK/T Formel als genaueste, wobei Augen mit dem Stadium III unvorhersehbar zu berechnen sind. (93,94)

Einige Studien und Case Reports bestätigten, dass die Implantation einer Linse mit Pinhole Effekt bei irregulären Hornhäuten zu einer Verbesserung der subjektiven und objektiven

Sehergebnissen führt. (83) Hornhaut-Inlays mit kleiner Blende werden seit mehreren Jahren mit guten Ergebnissen zur Korrektur der Alterssichtigkeit eingesetzt.(95,96)

Dick et al. führte bilaterale Implantationen der IC-8 Linsen bei Patient\*innen zur Presbyopiekorrektur durch und stellte einen erweiterten Schärfebereich mit besserem Zwischen- und Nahsehen bei der bilateralen Patient\*innengruppe fest. Auch bei Patient\*innen mit irregulärer Hornhaut können Linsenimplantationen mit Pinhole Effekt visuelle Verzerrungen vermindern und führen somit zu verbessertem Sehen.(97)

Shajari et al konnte ähnlich wie Grabner et al. bei der Implantation einer IC-8 IOL in den Kapselsack eine Verbesserung der UDVA, UIVA und UNVA erkennen. Zudem zeigen die Defokusierungskurven postoperativ bessere Ergebnisse als die präoperativen Untersuchungen. Auch zeigte sich eine geringere Zunahme von optischen Phänomenen im Vergleich zu multifokalen IOLs.(81,97–100)

Bestehende Arbeiten berichten von einem indirekten Zusammenhang zwischen Pupillengröße und Tiefenschärfe. Zusätzlich besteht ein Zusammenhang zwischen Pupillengröße und HOAs, wobei kleinere Pupillen den visuellen Effekt an der Hornhaut positiv für betroffene Patient\*innen beeinflussen können.(101–103)

Die Arbeit von Franco et al. untersuchte das Auftreten von HOAs bei schweren Hornhautunregelmäßigkeiten. Aufgrund der schwierigen Berechnung der IOL-Stärke bei irregulären Hornhäuten wurde die Pinhole Linse ausgewählt.(82)

Dies konnte Franco et al. in seiner Arbeit durch die Verbesserung der CDVA bestätigen.(82) Auch in der Arbeit von Berg et al, konnte der Zusammenhang zwischen HOAs bei Patient\*innen mit Keratokonus und der CDVA bestätigt werden. Durch den Einsatz einer Lochblende in der IOL können Aberrationen reduziert werden und dies somit zu einer Verbesserung der Sehkraft führen.(104)

Schultz et al(83) beschreibt in seinem Case Report nach perforierendem Augentrauma den therapeutischen Einsatz einer Hinterkammer IOL mit Pinhole Effekt zur Behandlung von Hornhautunregelmäßigkeiten, Irisdefekten und Aphakie. Bei Patient\*innen mit Katarakt bietet diese Technik eine Möglichkeit die Unabhängigkeit von Brillen zu erhöhen.(100) Schultz et al verwendet diese Technik erstmals bei einer Kataraktoperation nach einem perforierenden Augentrauma bei einem jungen Patienten. Dies erzielte gute Endergebnisse. Weitere mögliche Einsatzbereiche dieser Linsenart sieht Schultz et al in der Behandlung von

Altersweitsichtigkeit von Patient\*innen mit früheren refraktiven Laseroperationen oder bei Patient\*innen mit vorangegangener monofokaler IOL in einem Auge. Bei Patient\*innen mit Hornhautunregelmäßigkeiten biete die IOL mit kleiner Apertur eine Behandlungsoption zur Verbesserung der unkorrigierten Fern - und Nahsicht.(83)

Trindade et al. beschreibt in seinem Case Report, dass bei Patient\*innen mit Keratokonus die Kombination aus einer Linse mit Lochblenden-Effekt und eine hochzylinderkorrigierende torische Linse zu einer Verbesserung der unkorrigierten Fern - und Nahsehschärfe führt. Bei geringem Astigmatismus kann eine Lochblende allein zur Korrektur ausreichen, jedoch bei einem Zylinder von mehr als 2D sollte diese mit einer torischen IOL kombiniert werden. Besonders bei Patient\*innen mit großer Pupille können Aberrationen höherer Ordnung die Sehschärfe bei unregelmäßiger Hornhaut einschränken.(78)

Hyeck-Soo Son et al. berichtet in seinem Case Report über einen Patienten mit RK in der Vorgeschichte, der nach einer Kataraktoperation aufgrund von subjektiv schwankenden Refractionen eine zusätzliche Pinhole-Linse in den Sulcus implantiert bekam. Wie schon in einigen anderen Studien beschrieben, ist die größte Herausforderung bei Patient\*innen mit vorangegangenen chirurgischen Eingriffen an der Hornhaut, die Berechnung der IOL Stärke, da es meist zu einer Unterschätzung der Linsenstärke und somit zu einer hyperopen Refraktionsfehler kommen kann.(54,105–107) Hyeck et al. empfehlen den ASCRS-Post-RK-Rechner oder die Holladay-II Formel, die auf der Holladay IOL Consultant-Software<sup>12</sup> basiert, als nützliche Formeln zur Berechnung der IOL - Stärke.(105,108) Auch die Messwerte vor dem chirurgischen Eingriff können von Nutzen sein. Diese sind jedoch meistens nicht verfügbar.(105)

Jennifer Y.M. Ling et al. vergleicht in ihrer Arbeit das Outcome bei Keratokonus Patient\*innen mit torischen/nicht torischen Linsen. Die IOL Formel Barrett Universal II sowie die SRK/T Formel liefern die beste Vorhersagegenauigkeit bei refraktive Ergebnissen.(56,91,94,109,110).

Die Barrett Universal II-Formel wird wegen ihrer angeblichen Genauigkeit aufgrund eines weiteren biometrischen Wertes immer beliebter.(111) Diese Formel zeigt jedoch bei Hyperopie mit zunehmender Achslänge und Vorderkammertiefe einen höheren Vorhersagefehler, was sie besonders nützlich bei Keratokonus macht. Da dieser häufig mit Achsenmyopie einhergeht.(31,112) Die SRK/T Formel zeigt auch bei Keratokonus oder längeren Augen mit einer Achsenlängen über 25 mm eine gute Vorhersagegenauigkeit. (56,111,113,114) Ling et

al. stimmt mit anderen Studien überein, dass bei Patient\*innen mit leichten bis mittelschweren nicht progressivem Keratokonus mit stabilem regelmäßigem Astigmatismus die Verwendung einer torischen Linse sinnvoll sei.(56,94,115,116)

Dick et al. führt die Implantation von Linsen mit Pinhole Effekt ( IC-8) bei Patient\*innen nur an einem oder an beiden Augen durch. Die bilaterale Gruppe zeigte eine geringere Patient\*innen Zufriedenheit und höhere Werte für Halos, als die monolaterale Gruppe.(97)

In den Arbeiten von Franco et al. (82)Schulz et al. (83) wurden Untersuchungen am Gesichtsfeld nach der Implantation einer Linse mit Pinhole Effekt durchgeführt. Es konnten an den operierten Augen keine Defekte oder Verkleinerungen des Gesichtsfeldes festgestellt werden.

## **6.1 Limitationen**

Die Arbeiten weisen eine geringe Anzahl an Studienteilnehmer\*innen auf. Das Follow up der Patient\*innen ist individuell von der Studie abhängig und variiert von einigen Wochen bis Monaten.

Die Sehstärke in den Arbeiten wurde in unterschiedlichen Einheiten und Abständen angegeben, was die Vergleichbarkeit der Studien erschwerte.

## 7 Literaturverzeichnis

1. Lang GK, Herausgeber. Augenheilkunde [Internet]. 6. Aufl. Stuttgart: Georg Thieme Verlag; 2019 [zitiert 26. Januar 2024]. Verfügbar unter: <https://eref.thieme.de/10.1055/b-006-163269>
2. Lüllmann-Rauch R, Asan E. Taschenlehrbuch Histologie [Internet]. 6. Aufl. Stuttgart: Georg Thieme Verlag; 2019 [zitiert 11. Februar 2024]. Verfügbar unter: <https://eref.thieme.de/10.1055/b-006-163361>
3. Ardjomand N, Wissiak E. Astigmatismus: Diagnose und Therapie. In: Pfeiffer N, Cursiefen C, Holz FG, Lagrèze WA, Herausgeber. Die Augenheilkunde [Internet]. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 2023 [zitiert 3. Mai 2024]. S. 1–15. (Springer Reference Medizin). Verfügbar unter: [https://link.springer.com/10.1007/978-3-662-65929-8\\_163-1](https://link.springer.com/10.1007/978-3-662-65929-8_163-1)
4. Krachmer JH, Feder RS, Belin MW. Keratoconus and related noninflammatory corneal thinning disorders. *Surv Ophthalmol*. Januar 1984;28(4):293–322.
5. Wellish KL, Glasgow BJ, Beltran F, Maloney RK. Corneal ectasia as a complication of repeated keratotomy surgery. *J Refract Corneal Surg*. 1994;10(3):360–4.
6. Seiler T, Koufala K, Richter G. Iatrogenic keratectasia after laser in situ keratomileusis. *J Refract Surg Thorofare NJ* 1995. 1998;14(3):312–7.
7. Seiler T, Quurke AW. Iatrogenic keratectasia after LASIK in a case of forme fruste keratoconus. *J Cataract Refract Surg*. Juli 1998;24(7):1007–9.
8. Gatinel, Damien. „Eye rubbing, a sine qua non for keratoconus.“ *Int J Kerat Ect Cor Dis* 5.1 (2016): 6-12.
9. Moran S, Gomez L, Zuber K, Gatinel D. A Case-Control Study of Keratoconus Risk Factors. *Cornea*. Juni 2020;39(6):697–701.
10. Ambrósio R. Post-LASIK Ectasia: Twenty Years of a Conundrum. *Semin Ophthalmol*. 17. Februar 2019;34(2):66–8.
11. Krachmer JH. Pellucid Marginal Corneal Degeneration. *Arch Ophthalmol*. 1. Juli 1978;96(7):1217–21.
12. Jinabhai A, Radhakrishnan H, O'Donnell C. Pellucid corneal marginal degeneration: A review. *Contact Lens Anterior Eye*. April 2011;34(2):56–63.
13. Robin JB, Schanzlin DJ, Verity SM, Barron BA, Arffa RC, Suarez E, u. a. Peripheral corneal disorders. *Surv Ophthalmol*. Juli 1986;31(1):1–36.
14. Godefrooij DA, De Wit GA, Uiterwaal CS, Imhof SM, Wisse RPL. Age-specific Incidence and Prevalence of Keratoconus: A Nationwide Registration Study. *Am J Ophthalmol*. März 2017;175:169–72.
15. Torres Netto EA, Al-Otaibi WM, Hafezi NL, Kling S, Al-Farhan HM, Randleman JB, u. a. Prevalence of keratoconus in paediatric patients in Riyadh, Saudi Arabia. *Br J Ophthalmol*. Oktober 2018;102(10):1436–41.
16. Kennedy RH, Bourne WM, Dyer JA. A 48-Year Clinical and Epidemiologic Study of Keratoconus. *Am J Ophthalmol*. März 1986;101(3):267–73.
17. Rabinowitz YS. Keratoconus. *Surv Ophthalmol*. Januar 1998;42(4):297–319.
18. Gordon-Shaag A, Millodot M, Shneor E, Liu Y. The Genetic and Environmental Factors for Keratoconus. *BioMed Res Int*. 2015;2015:1–19.

19. Jhanji V, Sharma N, Vajpayee RB. Management of keratoconus: current scenario. *Br J Ophthalmol*. 1. August 2011;95(8):1044–50.
20. McMonnies CW. Abnormal Rubbing and Keratectasia. *Eye Contact Lens Sci Clin Pract*. November 2007;33(6):265–71.
21. Hashemi H, Heydarian S, Yekta A, Ostadimoghaddam H, Aghamirsalim M, Derakhshan A, u. a. High prevalence and familial aggregation of keratoconus in an Iranian rural population: a population-based study. *Ophthalmic Physiol Opt*. Juli 2018;38(4):447–55.
22. Wisse RPL, Kuiper JJW, Gans R, Imhof S, Radstake TRDJ, Van Der Lelij A. Cytokine Expression in Keratoconus and its Corneal Microenvironment: A Systematic Review. *Ocul Surf*. Oktober 2015;13(4):272–83.
23. Khaled ML, Helwa I, Drewry M, Seremwe M, Estes A, Liu Y. Molecular and Histopathological Changes Associated with Keratoconus. *BioMed Res Int*. 2017;2017:1–16.
24. Fernandes BF, Logan P, Zajdenweber MoysesE, Santos LN, Cheema DP, Burnier MN. Histopathological study of 49 cases of keratoconus. *Pathology (Phila)*. Oktober 2008;40(6):623–6.
25. Sykakis E, Carley F, Irion L, Denton J, Hillarby MC. An in depth analysis of histopathological characteristics found in keratoconus. *Pathology (Phila)*. April 2012;44(3):234–9.
26. Fournié P, Touboul D, Arné JL, Colin J, Malecaze F. Kératocône. *J Fr Ophtalmol*. September 2013;36(7):618–26.
27. Rabinowitz YS. Videokeratographic Indices to Aid in Screening for Keratoconus. *J Refract Surg*. September 1995;11(5):371–406.
28. Lee CM, Afshari NA. The global state of cataract blindness. *Curr Opin Ophthalmol*. Januar 2017;28(1):98–103.
29. Prevalences and causes of vision impairment in elderly Chinese: a socioeconomic perspective of a comparative report nested in Jiangsu Eye Study. *Int J Ophthalmol [Internet]*. 18. Juli 2016 [zitiert 24. Januar 2024]; Verfügbar unter: [http://www.ijo.cn/gjyken/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20160719&flag=1](http://www.ijo.cn/gjyken/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160719&flag=1)
30. Aboobaker S, Courtright P. Barriers to cataract surgery in Africa: A systematic review. *Middle East Afr J Ophthalmol*. 2016;23(1):145.
31. Rius A, Lansingh V, Valencia L, Carter M, Eckert K. Social inequalities in blindness and visual impairment: A review of social determinants. *Indian J Ophthalmol*. 2012;60(5):368.
32. Michael R, Bron AJ. The ageing lens and cataract: a model of normal and pathological ageing. *Philos Trans R Soc B Biol Sci*. 27. April 2011;366(1568):1278–92.
33. Shajari M, Priglinger S, Kohnen T, Kreutzer T, Mayer WJ, Herausgeber. *Katarakt- und Linsenchirurgie*. Berlin [Heidelberg]: Springer; 2023. 476 S.
34. Neuhann I, Neuhann L, Neuhann T. Die senile Katarakt. *Klin Monatsblätter Für Augenheilkd*. April 2022;239(04):615–33.
35. Tseng VL, Yu F, Lum F, Coleman AL. Risk of Fractures Following Cataract Surgery in Medicare Beneficiaries. *JAMA [Internet]*. 1. August 2012 [zitiert 9. Februar 2024];308(5). Verfügbar unter: <http://jama.jamanetwork.com/article.aspx?doi=10.1001/jama.2012.9014>
36. Dietze H. Die Bestimmung der Sehschärfe. *Klin Monatsblätter Für Augenheilkd*.

September 2018;235(09):1057–75.

37. Wesemann W, Schiefer U, Bach M. Neue DIN-Normen zur Sehschärfebestimmung. *Ophthalmol.* September 2010;107(9):821–6.
38. Diepes H, Krause K, Rohrschneider K. *Sehbehinderung: Ursachen - Auswirkungen - Versorgung.* Heidelberg: DOZ Verl; 2007. 249 S.
39. Schober H, Wohletz J, Zolleis F. [Monochromatic aberration of the human eye]. *Klin Monatsbl Augenheilkd.* August 1969;155(2):243–57.
40. Friedburg D, Krause K. Subjektive Refraktionsbestimmung. *Ophthalmol.* 1. August 2002;99(8):657–67.
41. Dietze H, Herausgeber. *Die optometrische Untersuchung* [Internet]. 2. Aufl. Stuttgart: Georg Thieme Verlag; 2015 [zitiert 25. April 2024]. Verfügbar unter: <http://www.thieme-connect.de/DOI/DOI?10.1055/b-003-113733>
42. Waring IV GO, Garg S (Sam), Gupta PK, Lee BS, Reeves SW, Rocha KM, u. a., Herausgeber. *Refractive surgery.* 2023.–2024., last major revision 2020-2021 Aufl. San Francisco, Calif: American Academy of Ophthalmology; 2023. 239 S. (Basic and clinical science course / American Academy of Ophthalmology).
43. Lee AC, Qazi MA, Pepose JS. Biometry and intraocular lens power calculation. *Curr Opin Ophthalmol.* Januar 2008;19(1):13–7.
44. Hoffman RS, Vasavada AR, Allen QB, Snyder ME, Devgan U, Braga-Mele R. Cataract surgery in the small eye. *J Cataract Refract Surg.* November 2015;41(11):2565–75.
45. Rabsilber TM, Becker KA, Frisch IB, Auffarth GU. Anterior chamber depth in relation to refractive status measured with the Orbscan II Topography System. *J Cataract Refract Surg.* November 2003;29(11):2115–21.
46. Wallace DK, Plager DA. Corneal Diameter in Childhood Aphakic Glaucoma. *J Pediatr Ophthalmol Strabismus.* September 1996;33(5):230–4.
47. Vass C, Menapace R, Schmetterer K, Findl O, Rainer G, Steineck I. Prediction of pseudophakic capsular bag diameter based on biometric variables12: *J Cataract Refract Surg.* Oktober 1999;25(10):1376–81.
48. Hoffer KJ. Clinical results using the Holladay 2 intraocular lens power formula. *J Cataract Refract Surg.* August 2000;26(8):1233–7.
49. Kane JX, Chang DF. Intraocular Lens Power Formulas, Biometry, and Intraoperative Aberrometry. *Ophthalmology.* November 2021;128(11):e94–114.
50. Ridley H. Intraocular acrylic lens. *Trans Ophthalmol Soc UK.* 1951;71:617-21.
51. Apple DJ, Park SB, Merkley KH, Brems RN, Richards SC, Langley KE, u. a. Posterior chamber intraocular lenses in a series of 75 autopsy eyes Part I: Loop location. *J Cataract Refract Surg.* Juli 1986;12(4):358–62.
52. Apple DJ. *Foldable intraocular lenses: evolution, clinicopathologic correlations, and complications.* Slack Incorporated; 2000.
53. Apple DJ. *Intraocular lenses: evolution, designs, complications, and pathology.* (No Title). 1989.
54. Cheng JW, Wei RL, Cai JP, Xi GL, Zhu H, Li Y, u. a. Efficacy of Different Intraocular Lens Materials and Optic Edge Designs in Preventing Posterior Capsular Opacification: A Meta-Analysis. *Am J Ophthalmol.* März 2007;143(3):428-436.e3.
55. Apple DJ, Solomon KD, Tetz MR, Assia EI, Holland EY, Legler UFC, u. a.

- Posterior capsule opacification. *Surv Ophthalmol.* September 1992;37(2):73–116.
56. Alio JL, Plaza-Puche AB, Fernández-Buenaga R, Pikkell J, Maldonado M. Multifocal intraocular lenses: An overview. *Surv Ophthalmol.* September 2017;62(5):611–34.
  57. Rampat R, Gatinel D. Multifocal and Extended Depth-of-Focus Intraocular Lenses in 2020. *Ophthalmology.* November 2021;128(11):e164–85.
  58. Schuster AK, Tesarz J, Vossmerbaeumer U. The Impact on Vision of Aspheric to Spherical Monofocal Intraocular Lenses in Cataract Surgery. *Ophthalmology.* November 2013;120(11):2166–75.
  59. Maddula S, Werner L, Ness PJ, Davis D, Zaugg B, Stringham J, u. a. Pathology of 157 human cadaver eyes with round-edged or modern square-edged silicone intraocular lenses: Analyses of capsule bag opacification. *J Cataract Refract Surg.* April 2011;37(4):740–8.
  60. Luo C, Wang H, Chen X, Xu J, Yin H, Yao K. Recent Advances of Intraocular Lens Materials and Surface Modification in Cataract Surgery. *Front Bioeng Biotechnol.* 8. Juni 2022;10:913383.
  61. Allarakhia L, Knoll RL, Lindstrom RL. Soft intraocular lenses. *J Cataract Refract Surg.* November 1987;13(6):607–20.
  62. Werner L. Intraocular Lenses. *Ophthalmology.* November 2021;128(11):e74–93.
  63. Čanović S, Konjevoda S, Didović Pavičić A, Stanić R. Intraocular Lens (IOL) Materials. In: Wang X, M. Ferreri F, Herausgeber. *Intraocular Lens [Internet]. IntechOpen; 2020 [zitiert 24. Februar 2024].* Verfügbar unter: <https://www.intechopen.com/books/intraocular-lens/intraocular-lens-iol-materials>
  64. Kapoor S, Gupta S. Basic Science of Intraocular Lens Materials. In: Wang X, M. Ferreri F, Herausgeber. *Intraocular Lens [Internet]. IntechOpen; 2020 [zitiert 24. Februar 2024].* Verfügbar unter: <https://www.intechopen.com/books/intraocular-lens/basic-science-of-intraocular-lens-materials>
  65. Olson RJ, Mamalis N, Werner L, Apple DJ. Cataract treatment in the beginning of the 21st century. *Am J Ophthalmol.* Juli 2003;136(1):146–54.
  66. Vega F, Millán MS, Gil MA, Garzón N. Optical Performance of a Monofocal Intraocular Lens Designed to Extend Depth of Focus. *J Refract Surg.* September 2020;36(9):625–32.
  67. Lapp T, Wacker K, Heinz C, Maier P, Eberwein P, Reinhard T. Cataract surgery—indications, techniques, and intraocular lens selection. *Dtsch Arztebl Int [Internet].* 30. Mai 2023 [zitiert 24. März 2024]; Verfügbar unter: <https://www.aerzteblatt.de/10.3238/arztebl.m2023.0028>
  68. De Silva SR, Evans JR, Kirthi V, Ziaei M, Leyland M. Multifocal versus monofocal intraocular lenses after cataract extraction. *Cochrane Eyes and Vision Group, Herausgeber. Cochrane Database Syst Rev [Internet].* 12. Dezember 2016 [zitiert 24. März 2024];2016(12). Verfügbar unter: <http://doi.wiley.com/10.1002/14651858.CD003169.pub4>
  69. Tsai LM. *Lens and cataract.* San Francisco: American Academy of Ophthalmology; 2021.
  70. Kanclerz P, Toto F, Grzybowski A, Alio JL. Extended Depth-of-Field Intraocular Lenses: An Update. *Asia-Pac J Ophthalmol.* Mai 2020;9(3):194–202.
  71. Savini G, Balducci N, Carbonara C, Rossi S, Altieri M, Frugis N, u. a. Functional assessment of a new extended depth-of-focus intraocular lens. *Eye.* März 2019;33(3):404–

- 10.
72. Savini G, Schiano-Lomoriello D, Balducci N, Barboni P. Visual Performance of a New Extended Depth-of-Focus Intraocular Lens Compared to a Distance-Dominant Diffractive Multifocal Intraocular Lens. *J Refract Surg*. April 2018;34(4):228–35.
73. Cheng H, Barnett JK, Vilupuru AS, Marsack JD, Kasthurirangan S, Applegate RA, u. a. A population study on changes in wave aberrations with accommodation. *J Vis*. 16. April 2004;4(4):3.
74. Multifocal Intraocular Lenses and Extended Depth of Focus Intraocular Lenses. *Asia-Pac J Ophthalmol* [Internet]. 2017 [zitiert 17. April 2024]; Verfügbar unter: [https://journals.lww.com/apjoo/Abstract/2017/07000/Multifocal\\_Intraocular\\_Lenses\\_and\\_Extended\\_Depth.8.aspx](https://journals.lww.com/apjoo/Abstract/2017/07000/Multifocal_Intraocular_Lenses_and_Extended_Depth.8.aspx)
75. Artal P, Manzanera S, Piers P, Weeber H. Visual effect of the combined correction of spherical and longitudinal chromatic aberrations. *Opt Express*. 18. Januar 2010;18(2):1637.
76. Narang P, Agarwal A, Kumar DA, Agarwal A. Pinhole pupilloplasty: Small-aperture optics for higher-order corneal aberrations. *J Cataract Refract Surg*. Mai 2019;45(5):539–43.
77. Dick BH, Piovella M, Vukich J, Vilupuru S, Lin L. Prospective multicenter trial of a small-aperture intraocular lens in cataract surgery. *J Cataract Refract Surg*. Juli 2017;43(7):956–68.
78. Trindade BLC, Trindade FC, Trindade CLC. Bilateral implantation of a supplementary intraocular pinhole. *J Cataract Refract Surg*. Mai 2021;47(5):627–33.
79. Gomes JAP, Tan D, Rapuano CJ, Belin MW, Ambrósio R, Guell JL, u. a. Global Consensus on Keratoconus and Ectatic Diseases. *Cornea*. April 2015;34(4):359–69.
80. Shajari M, Mackert MJ, Langer J, Kreutzer T, Wolf A, Kohnen T, u. a. Safety and efficacy of a small-aperture capsular bag–fixated intraocular lens in eyes with severe corneal irregularities. *J Cataract Refract Surg*. Februar 2020;46(2):188–92.
81. Langer J, Shajari M, Kreutzer T, Priglinger S, Mayer WJ, Mackert MJ. Predictability of Refractive Outcome of a Small-Aperture Intraocular Lens in Eyes With Irregular Corneal Astigmatism. *J Refract Surg Thorofare NJ* 1995. Mai 2021;37(5):312–7.
82. Franco F, Branchetti M, Vicchio L, Serino F, Piergentili M, Spagnuolo V, u. a. Implantation of a Small Aperture Intraocular Lens in Eyes with Irregular Corneas and Higher Order Aberrations. *J Ophthalmic Vis Res* [Internet]. 9. August 2022 [zitiert 20. Mai 2024]; Verfügbar unter: <https://knepublishing.com/index.php/JOVR/article/view/11568>
83. Schultz T, Dick HB. Small-Aperture Intraocular Lens Implantation in a Patient With an Irregular Cornea. *J Refract Surg*. Oktober 2016;32(10):706–8.
84. Trindade BLC, Trindade FC, Werner L, Trindade CLC. Long-term safety of in-the-bag implantation of a supplementary intraocular pinhole. *J Cataract Refract Surg*. Juni 2020;46(6):888–92.
85. Son HS, Khoramnia R, Mayer C, Labuz G, Yildirim TM, Auffarth GU. A pinhole implant to correct postoperative residual refractive error in an RK cataract patient. *Am J Ophthalmol Case Rep*. Dezember 2020;20:100890.
86. Jin H, Rabsilber T, Ehmer A, Borkenstein AF, Limberger IJ, Guo H, u. a. Comparison of ray-tracing method and thin-lens formula in intraocular lens power calculations. *J Cataract Refract Surg*. April 2009;35(4):650–62.

87. Preussner PR, Wahl J, Lahdo H, Dick B, Findl O. Ray tracing for intraocular lens calculation. *J Cataract Refract Surg.* August 2002;28(8):1412–9.
88. Preussner PR, Wahl J, Weitzel D. Topography-based intraocular lens power selection. *J Cataract Refract Surg.* März 2005;31(3):525–33.
89. Tonn B, Klaproth OK, Kohnen T. Anterior Surface-Based Keratometry Compared With Scheimpflug Tomography-Based Total Corneal Astigmatism. *Invest Ophthalmol Vis Sci.* 13. Januar 2015;56(1):291–8.
90. Canovas C, Van Der Mooren M, Rosén R, Piers PA, Wang L, Koch DD, u. a. Effect of the equivalent refractive index on intraocular lens power prediction with ray tracing after myopic laser in situ keratomileusis. *J Cataract Refract Surg.* Mai 2015;41(5):1030–7.
91. Savini G, Bedei A, Barboni P, Ducoli P, Hoffer KJ. Intraocular Lens Power Calculation by Ray-Tracing after Myopic Excimer Laser Surgery. *Am J Ophthalmol.* Januar 2014;157(1):150-153.e1.
92. Watson MP, Anand S, Bhogal M, Gore D, Moriyama A, Pullum K, u. a. Cataract surgery outcome in eyes with keratoconus. *Br J Ophthalmol.* März 2014;98(3):361–4.
93. Savini G, Abbate R, Hoffer KJ, Mularoni A, Imburgia A, Avoni L, u. a. Intraocular lens power calculation in eyes with keratoconus. *J Cataract Refract Surg.* Mai 2019;45(5):576–81.
94. Kamiya K, Iijima K, Nobuyuki S, Mori Y, Miyata K, Yamaguchi T, u. a. Predictability of Intraocular Lens Power Calculation for Cataract with Keratoconus: A Multicenter Study. *Sci Rep.* 22. Januar 2018;8(1):1312.
95. Dexl AK, Jell G, Strohmaier C, Seyeddain O, Riha W, Rückl T, u. a. Long-term outcomes after monocular corneal inlay implantation for the surgical compensation of presbyopia. *J Cataract Refract Surg.* März 2015;41(3):566–75.
96. Yılmaz ÖF, Alagöz N, Pekel G, Azman E, Aksoy EF, Çakır H, u. a. Intracorneal inlay to correct presbyopia: Long-term results. *J Cataract Refract Surg.* Juli 2011;37(7):1275–81.
97. Dick HB, Elling M, Schultz T. Binocular and Monocular Implantation of Small-Aperture Intraocular Lenses in Cataract Surgery. *J Refract Surg.* September 2018;34(9):629–31.
98. Bellucci R. Multifocal intraocular lenses: *Curr Opin Ophthalmol.* Februar 2005;16(1):33–7.
99. Gil MA, Varon C, Rosello N, Cardona G, Buil JA. Visual Acuity, Contrast Sensitivity, Subjective Quality of Vision, and Quality of Life with 4 Different Multifocal IOLs. *Eur J Ophthalmol.* März 2012;22(2):175–87.
100. Grabner G, Ang RE, Vilupuru S. The Small-Aperture IC-8 Intraocular Lens: A New Concept for Added Depth of Focus in Cataract Patients. *Am J Ophthalmol.* Dezember 2015;160(6):1176-1184.e1.
101. Yuan Y, Shao Y, Tao A, Shen M, Wang J, Shi G, u. a. Ocular Anterior Segment Biometry and High-Order Wavefront Aberrations During Accommodation. *Investig Ophthalmology Vis Sci.* 25. Oktober 2013;54(10):7028.
102. Muñoz G, Rohrweck S, Sakla HF, Altroudi W. Pinhole iris-fixated intraocular lens for dysphotopsia and photophobia. *J Cataract Refract Surg.* März 2015;41(3):487–91.
103. Ogle KN, Schwartz JT. Depth of Focus of the Human Eye\*. *J Opt Soc Am.* 1. März 1959;49(3):273.

104. Van Den Berg RM, Van Den Berg A, Rocha KM, Fetrin De Barros M, Dodhia M, Shahid M, u. a. Prediction of the small aperture intraocular lens on visual acuity in patients with keratoconus. *J Cataract Refract Surg* [Internet]. 10. Mai 2024 [zitiert 16. Juli 2024]; Verfügbar unter: <https://journals.lww.com/10.1097/j.jcrs.0000000000001480>
105. Son HS, Auffarth GU, Xia A, Yildirim TM, Mayer CS, Khoramnia R. Lösungswege zur IOL-Berechnung und Implantation bei Patienten nach radiärer Keratotomie. *Klin Monatsblätter Für Augenheilkd.* August 2020;237(08):968–71.
106. Koch DD, Liu JF, Emery JM, Hyde LL, Rock RL. Refractive Complications of Cataract Surgery After Radial Keratotomy. *Am J Ophthalmol.* Dezember 1989;108(6):676–82.
107. Baartman BJ, Karpuk K, Eichhorn B, Ferguson T, Sudhagoni R, Berdahl J, u. a. Extended depth of focus lens implantation after radial keratotomy. *Clin Ophthalmol.* Juli 2019;Volume 13:1401–8.
108. Abdelghany AA, Alio JL. Surgical options for correction of refractive error following cataract surgery. *Eye Vis.* Dezember 2014;1(1):2.
109. Visser N, Gast STJM, Bauer NJC, Nuijts RMMA. Cataract Surgery With Toric Intraocular Lens Implantation in Keratoconus: A Case Report. *Cornea.* Juni 2011;30(6):720–3.
110. Kane JX, Connell B, Yip H, McAlister JC, Beckingsale P, Snibson GR, u. a. Accuracy of Intraocular Lens Power Formulas Modified for Patients with Keratoconus. *Ophthalmology.* August 2020;127(8):1037–42.
111. Melles RB, Holladay JT, Chang WJ. Accuracy of Intraocular Lens Calculation Formulas. *Ophthalmology.* Februar 2018;125(2):169–78.
112. Ernst BJ, Hsu HY. Keratoconus Association with Axial Myopia: A Prospective Biometric Study. *Eye Contact Lens Sci Clin Pract.* Januar 2011;37(1):2–5.
113. Aristodemou P, Knox Cartwright NE, Sparrow JM, Johnston RL. Formula choice: Hoffer Q, Holladay 1, or SRK/T and refractive outcomes in 8108 eyes after cataract surgery with biometry by partial coherence interferometry. *J Cataract Refract Surg.* Januar 2011;37(1):63–71.
114. Narváez J, Zimmerman G, Stulting DR, Chang DH. Accuracy of intraocular lens power prediction using the Hoffer Q, Holladay 1, Holladay 2, and SRK/T formulas. *J Cataract Refract Surg.* Dezember 2006;32(12):2050–3.
115. Jaimes M, Xacur-García F, Alvarez-Melloni D, Graue-Hernández EO, Ramirez-Luquín T, Navas A. Refractive Lens Exchange With Toric Intraocular Lenses in Keratoconus. *J Refract Surg.* September 2011;27(9):658–64.
116. Navas A, Suárez R. One-year follow-up of toric intraocular lens implantation in forme fruste keratoconus. *J Cataract Refract Surg.* November 2009;35(11):2024–7.