

Aus dem Fachbereich Medizin
der Johann Wolfgang Goethe-Universität
Frankfurt am Main

betreut an der
Klinik für Augenheilkunde
Direktor: Prof. Dr. Thomas Kohnen

**Refraktives und visuelles Ergebnis nach
Neuausrichtung von rotierten torischen
Intraokularlinsen**

Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades der Medizin
des Fachbereichs Medizin
der Johann Wolfgang Goethe-Universität
Frankfurt am Main

vorgelegt von
Tsvetina Georgieva Sartory

aus Sofia, Republik Bulgarien

Frankfurt am Main, 2023

Dekan: Prof. Dr. Stefan Zeuzem
Referent: Prof. Dr. Mehdi Shajari
Ko-Referent/in: Prof. Dr. Thomas Kohnen
Tag der mündlichen Prüfung: 07. 12. 2023

Für meine Familie

Inhaltsverzeichnis

I. Abbildungsverzeichnis	7
II. Tabellenverzeichnis	8
III. Abkürzungsverzeichnis der fachspezifischen Abkürzungen	9
1. Einleitung	10
1.1 Aufbau des Auges	11
1.2 Dioptrischer Apparat des Auges	13
1.2.1 Cornea (Hornhaut).....	14
1.2.2 Humor aquosus (Kammerwasser)	16
1.2.3 Lens oculi (Linse)	17
1.2.4 Corpus vitreum (Glaskörper)	19
1.3 Visuelle Wahrnehmung	19
1.4 Akkommodationsstörungen	21
1.4.1 Presbyopie (Alterssichtigkeit)	21
1.5 Refraktionsanomalien.....	21
1.5.1 Myopie (Kurzsichtigkeit).....	22
1.5.2 Hyperopie (Weitsichtigkeit).....	22
1.5.3 Astigmatismus (Hornhautverkrümmung)	22
1.5.4 Möglichkeiten der Astigmatismuskorrektur	26
1.6 Katarakt.....	27
1.6.1 Epidemiologie der Katarakt.....	27
1.6.2 Klassifikation der Katarakt	28
1.7 Kataraktoperation	29
1.7.1 Historische Entwicklung der Kataraktchirurgie.....	29
1.7.2 Phakoemulsifikation.....	31

1.7.3	Femtosekundenlaserassistierte Kataraktoperation	32
1.7.4	Refraktiver Linsenaustausch (RLA)	32
1.8	Intraokularlinsen	33
1.8.1	Entwicklung der Intraokularlinsen	33
1.8.2	IOL Material	35
1.8.3	Optik der IOL	36
1.8.4	Auswirkung der Ausrichtung der torischen IOL auf das refraktive Ergebnis 38	
1.8.5	Haptik der IOL	38
1.9	Standardlinsen Chirurgie	39
1.10	Spezielle Linsen Chirurgie	40
1.11	Refraktive Intraokularlinsen Chirurgie	40
1.12	Komplikationen nach Katarakt Chirurgie	40
2.	Ziel der Arbeit	42
3.	Material und Methoden	43
3.1	Einschlusskriterien	44
3.2	Ausschlusskriterien	44
3.3	Präoperative Untersuchungsmethoden	44
3.4	Durchführung der Linsenoperation	45
3.4.1	Docking, Stabilisierung und Kapsulotomie	45
3.4.2	Linsenfragmentierung	45
3.4.3	Implantation der torischen Linse	46
3.5	Die postoperative Kontrolle	46
3.6	IOL-Rotations-Operation	47
3.7	Gruppen- und Subgruppenanalyse	47
4.	Ergebnisse	48

4.1	Visuelle Ergebnisse nach der Linsenoperation (BCVA und UDVA).....	49
4.2	Astigmatismus nach der Linsenoperation	50
4.3	Rotation der Intraokularlinse.....	51
4.3.1	Richtung der Rotation	51
4.3.2	Visuelle Ergebnisse nach der Rotation	52
4.3.3	Astigmatismus nach der Rotation	53
4.4	Gruppenanalyse	53
4.4.1	Visuelle Ergebnisse und residualer Astigmatismus	54
4.4.2	Subgruppenanalyse.....	55
5.	Diskussion.....	60
6.	Zusammenfassung	66
7.	Summary.....	68
8.	Literaturverzeichnis	70
9.	Danksagung	77
10.	Schriftliche Erklärung.....	78

I. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Aufbau des Auges (Abbildung nach Grey).....	12
Abbildung 2: Aufbau der Hornhaut (Quelle: Springer)	16
<i>Abbildung 3: Struktur und Anatomie der menschlichen Linse (modifiziert nach Joan E. Roberts, Fordham University, Department of Natural Sciences)</i>	<i>19</i>
Abbildung 4: Visuelle Wahrnehmung (Anatomy of the Human Visual Pathway, Marek Joukal, Springer)	21
Abbildung 5: Astigmatismusformen (modifiziert nach der Abbildung von Dr. David Kang).....	24
Abbildung 6: C-Haptik versus Plattenhaptik einer einstückigen Acryllinse (Journal of Refractive Surgery. 2013; 29 (4): 252–259).....	39
Abbildung 7: Vergleich im BCVA – präoperativ, postoperativ und nach der Rotation der torischen IOL	50
Abbildung 8: Zylinderstärke präoperativ, vor Rotation und nach Rotation	50
Abbildung 9: Der Grad der Drehung und die Haptik	52
Abbildung 10: UCVA nach der Linsenoperation und postrotatorisch	52
Abbildung 11: Änderung des Zylinders präoperativ, vor und nach der Rotation	53
Abbildung 12: Postrotatorischer Restzylinder (D) aufgeteilt in Gruppen hinsichtlich der Rückberechnung	55
Abbildung 13: Der Anteil der Patienten innerhalb x D des Vorhersagefehlers (in Prozent %)... ..	59

II. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Eigenschaften der Studienstichprobe	48
Tabelle 2: Linsenmodelle in der Studie.....	49
Tabelle 3: Refraktive und visuelle Ergebnisse der Subgruppenanalyse	57
Tabelle 4: Die Fälle in der Untergruppe mit hoher Zylinderstärke IOL (≥ 2 D) und mit Restzylinder ≥ 1 D	58

III. Abkürzungsverzeichnis der fachspezifischen Abkürzungen

ATR	Engl.: "against the rule astigmatism", Astigmatismus gegen die Regel
BCVA	Engl.: "best-corrected visual acuity", Bestkorrigierte Sehschärfe
CCT	Engl.: "central corneal thickness", zentrale Hornhautdicke
CME	Engl.: "cystoid macular edema", zystoides Makulaödem
D	Diopter
ECCE	extrakapsuläre Kataraktextraktion
EDoF-Linse	Engl.: "Extended Depth of Focus", Tiefenschärfelinse
EPT	Engl.: "effective phacoemulsification time" effektive Phakoemulsifikationszeit
FSAK	femtosekundenlaserassistierte Keratotomie
ICCE	intrakapsuläre Kataraktextraktion
IOL	Intraokularlinse
LASIK	Laser-in-situ-Keratomileusis
mIOL	multifokale Intraokularlinse = mehrfokale Intraokularlinse
OBL	Engl.: "oblique astigmatism", schräger Astigmatismus
Phako	Phakoemulsifikation
PMMA	Polymethylmethacrylat
PRK	Photorefraktive Keratektomie
PVDF	Polyvinylidenfluorid
PTK	Phototherapeutische Keratektomie
^a SE	sphärisches Äquivalent
SMILE	Engl.: "small incision lenticule extraction"
tIOL	torische Intraokularlinse
UDVA	Engl.: "uncorrected visual acuity" (unkorrigierte Sehschärfe)
UGH-Syndrom	Uveitis-Glaukom-Hyphäma-Syndrom
VKL	Vorderkammerlinse
WTR	Engl.: "with the rule astigmatism", Astigmatismus mit der Regel

1. Einleitung

*„Zweierlei gibt es, Wissenschaft und Einbildung,
erstere führt zum Wissen, letztere zum Nichtwissen.“*

Hippokrates

Albrecht von Graefe wird der Vater der modernen Ophthalmologie genannt. Er eröffnete 1868 die augenärztliche Abteilung an der Charité und etablierte die Augenheilkunde als universitäres Fach in den deutschen Universitäten. Unter anderem verbesserte er die Kataraktchirurgie und schrieb viele wissenschaftliche Artikel über diverse Augenerkrankungen. Eine besonders fruchtbare Zeit für die Augenheilkunde kam mit dem technischen und industriellen Wandel zu Beginn des zwanzigsten Jahrhunderts. Gewaltige Fortschritte in der Technik führten auch zu Neuentwicklungen in der Medizin. So trieb die Herstellung neuer diagnostischer Geräte und Mikroskope die Vertiefung des Wissens über die Anatomie und Struktur des Auges voran. Im Jahr 1884 stellte Carl Koller die Lokalanästhesie und die Möglichkeit, diese bei Augenoperationen anzuwenden, vor und leitete damit eine neue Ära der operativen Augenheilkunde ein. Hierdurch kam es in dieser Zeit zur Entwicklung vieler verschiedener operativer Materialien und Techniken. Nach dem Zweiten Weltkrieg erfand Dr. Harold Ridley im Jahr 1949 die erste künstliche intraokulare Linse als Ersatz für die körpereigene getrübe Linse (Katarakt) und eröffnete so mit seiner Entdeckung den erfolgreichen Weg der Linsenoperation. Die Linsenoperation mit Implantation einer Kunstlinse ist heute einer der häufigsten und sichersten chirurgischen Eingriffe weltweit. Im Jahr 2017 wurden in Deutschland knapp 867.821 intraokulare Eingriffe erfasst. Davon nimmt die Kataraktchirurgie mit einer Zahl von 361.611 Kataraktoperationen (42 %) den zweiten Platz nach der intravitrealen Medikamenteneingaben ein.¹ Nach statistischen Schätzungen lassen sich jährlich in Deutschland ca. 1 Million Menschen an der Katarakt operieren.

In den letzten 70 Jahren hatten Forscher, Mediziner und Hersteller versucht, eine künstliche Linse zu entwickeln, die eine gute Sehschärfe in allen Entfernungen

leisten kann, einen Hornhautastigmatismus ausgleicht und möglichst wenig unerwünschte Nebeneffekte hat. Trotz der signifikanten Entwicklung verschiedener Linsenmodelle und Designs wurde das Ziel für die Herstellung einer perfekten Kunstlinse noch nicht erreicht. Die einfachste intraokulare Kunstlinse ist sphärisch aufgebaut. Sie bildet für eine bestimmte Brennweite das Objekt scharf auf die Netzhaut ab. Anhand verschiedener Modifikationen der sphärischen Kunstlinsen erschienen auch die sogenannten Premiumlinsen. Unter dem Begriff „Premiumlinse“ wird eine Kunstlinse verstanden, die eine spezielle weitere Anforderung erfüllt, wie beispielsweise die torische Linse. Sie wurde zuerst 1992 von Shimizu et al.² vorgestellt und ermöglicht neben dem Ausgleich einer Weit- oder Kurzsichtigkeit die Korrektur einer Hornhautverkrümmung (cornealer Astigmatismus). Vor der Linsenoperation wird die Stärke der Kunstlinse berechnet und ihre Achsenlage (bei torischen Linsenimplantate) so gewählt, dass sie den refraktiven Fehler und die Hornhautverkrümmung ausgleichen kann. Die kalkulierte Achse wird als primär berechnete Achse bezeichnet.

Die folgende Arbeit beschäftigt sich mit der ungeplanten Rotation einer torischen Intraokularlinse, welche nach der grauen Star Operation auftreten kann. Hier dreht sich die Kunstlinse im Kapselsack, was in manchen Fällen zu einer erneuten Operation zur Neuausrichtung (Re-Rotation) der Intraokularlinse führt. Des Weiteren untersucht die Arbeit das refraktive und visuelle Ergebnis nach eben dieser Neuausrichtung und vergleicht zwei Methoden zur Neuausrichtung der Intraokularlinse: auf die primär berechnete Achse und auf eine neu postoperativ berechnete Achse.

1.1 Aufbau des Auges

Der Augapfel (Oculus bulbi) hat ein Gewicht von ca. 7,5 g und ist durchschnittlich 24 mm lang. Mit seinen drei Hüllen und drei Räumen ist der Bulbus in der Augenhöhle (Orbita) gelegen. Die Augen liegen zu beiden Seiten der Nasenwurzel. Der vordere, exponierte Teil des Auges wird durch die Lider bedeckt und durch die anderen Adnexa* vor Schädigung geschützt.^{3,4}

Adnexa*: zusammenfassende Bezeichnung für die Anhangsgebilde; dazu gehören Lider, Wimpern, Augenbrauen, Tränendrüse und Tränenwege

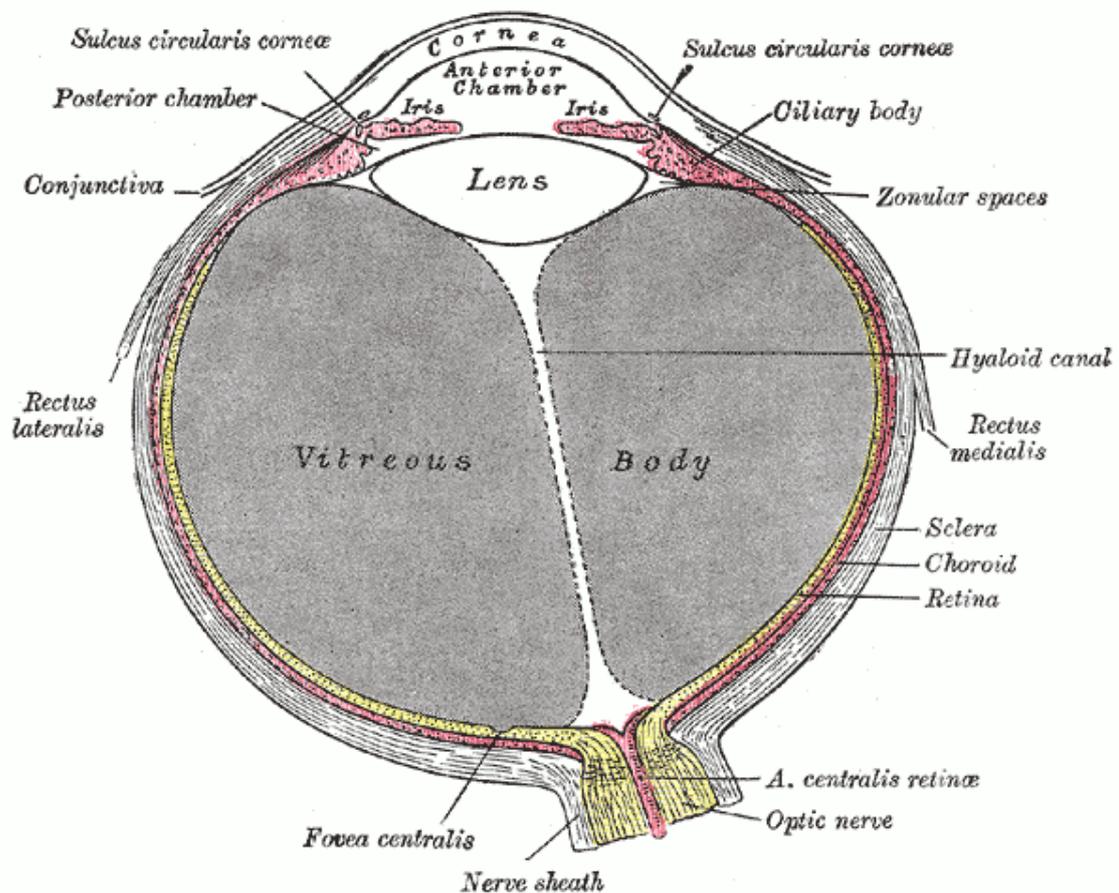


Abbildung 1: Aufbau des Auges (Abbildung nach Grey)

Die drei Hüllen:

- **Tunica fibrosa:** Sie besteht aus Hornhaut (Cornea), Lederhaut (Sklera) und Bindehaut (Conjunctiva).
- **Tunica vasculosa:** Sie besteht aus Regenbogenhaut (Iris), Strahlenkörper (Corpus ciliare) und Aderhaut (Choroidea).
- **Tunica nevrosa:** Sie besteht aus Netzhaut (Retina) mit den Photorezeptoren und anderen Nervenzellen.

Die drei Räume:

- **Vordere Augenkammer:** Das ist der Raum zwischen der Rückfläche der Hornhaut und der Linsenvorderfläche mit dem Kammerwinkel, der Irisvorderfläche sowie dem Schlemmischen Kanal, durch den der Abfluss von Kammerwasser erfolgt.
- **Hintere Augenkammer:** Sie wird begrenzt durch die Hinterfläche der Iris, den Sulcus ciliaris mit dem Ziliarkörper (Corpus ciliare), den Zonulapparat, die Ziliarfortsätze, die Vorderfläche des peripheren Glaskörpers und die periphere Linsenhinterfläche.
- **Glaskörperraum:** Hinter der hinteren Augenkammer befindet sich der Glaskörper (Corpus vitreum). Der Glaskörper ist eine klare, gelartige Substanz, die größtenteils aus Wasser besteht. Er füllt das Auge von innen aus und trägt zur Stabilisierung der verschiedenen Netzhautschichten und Netzhautgefäße bei. Die gelartigen Eigenschaften des Glaskörpers lassen sich auf ein Netz von Kollagenfasern zurückführen, die Wasser binden. Durch seine weiche Konsistenz ist der Glaskörper verantwortlich dafür, dass der Augapfel tonisiert bleibt und nach Druck von außen wieder seine ursprüngliche Form einnimmt.⁵

1.2 Dioptrischer Apparat des Auges

Die folgenden anatomischen Strukturen gehören zum dioptrischen Apparat:

- Die Cornea (Die Hornhaut des Auges),
- Der Humor aquosus (Das Kammerwasser),
- Die Lens oculi (Die intraokulare Linse),
- Das Corpus vitreum (Der Glaskörper).

Als „dioptrischen Apparat des visuellen Systems“ bezeichnet man die Gesamtheit der lichtbrechenden Strukturen des Auges.^{6,7} Die größte Rolle im dioptrischen Apparat des Auges spielen als brechende Medien die Hornhaut und die Linse. Durch ihre durchsichtige Farbe und den unterschiedlichen Brechungsindex erfüllen sie ihre Hauptaufgabe: die Lichtbrechung aller

Lichtstrahlen, die von einem Punkt eines betrachteten Objekts ausgehen. Die gebrochenen Strahlen werden wieder zu der Fovea* der Netzhaut zusammengeführt. So entsteht auf der Retina physiologisch ein verkleinertes und umgekehrtes Bild des beobachtenden Objekts.

Fovea:* Die Fovea (*Fovea centralis*) oder auf Deutsch: die Sehgrube, ist eine im Zentrum der Makula (*Macula lutea*) gelegene Einsenkung, die in der Sehachse des Auges liegt. Sie repräsentiert den Bereich des schärfsten Sehens der Netzhaut und hat beim Menschen einen Durchmesser von etwa 1,5 mm.

1.2.1 Cornea (Hornhaut)

Die Hornhaut hat die Form eines Uhrglases und verfügt über eine konvex gekrümmte Oberfläche. Der durchschnittliche horizontale Durchmesser der Hornhaut beträgt 11,6 mm.¹¹ Peripher zirkulär besteht eine Verbindung der Hornhaut mit der Sklera (Lederhaut). Am Übergang von Hornhaut zu Sklera liegen der Limbus corneae und der Sulcus sclerae. Dabei ist die Hornhaut stärker gekrümmt als die Sklera.^{3,4} Weiterhin wird die Hornhaut am Rand von der Bindehaut (*Conjunctiva bulbi*) überlagert. Die zentrale Hornhautdicke (CCT) hat im Durchschnitt eine Dicke von 536 µm und wird nach außen hin dicker. Sie hat einen fünfschichtigen Aufbau.⁸ Von außen nach innen lagern sich das Kornealepithel, die Membrana limitans anterior (Bowman-Membran), das Stroma corneae, die Membrana limitans posterior (Descemet-Membran) und das Endothel aneinander an (s. Abb. 2).⁹

- **Kornealepithel**

Das Hornhautepithel besteht aus vier bis sechs Schichten unverhornten Plattenepithels, die auf einer Basalmembran liegen. Die äußeren zwei Epithelschichten, die an den Tränenfilm angrenzen, sind mit vielen Mikrovilli besetzt. Diese Zellen tragen zur Stabilisierung des Tränenfilms bei und sind an der Aufnahme von Nährstoffen beteiligt. Damit der Transport von Flüssigkeit und Nährstoffen in die Zellen funktioniert, verfügen die epithelialen Zellen über eine semipermeable Membran. Nach den äußeren zwei Schichten folgen mehrere

Schichten aus größeren Zellen. Die innerste Schicht des Kornealepithels besteht aus Basalzellen, die direkt mit der Basalmembran (Bowman Membran) verbunden sind. Im Bereich des Limbus corneae sind die Stammzellen angesiedelt, durch die sich die Hornhaut bei Verletzungen von außen nach innen regeneriert.

- **Membrana limitans anterior (Bowman-Membran)**

Sie besteht aus Kollagenfibrillen in einer Grundsubstanz aus Mucoprotein. Die zwei Schichten aus Kollagen enthalten keine Zellen, sodass bei deren Verletzung die Heilung des Defekts in einer Narbenbildung resultiert. Die Membrana limitans anterior ist von sensiblen Nervenfasern durchzogen und damit sehr schmerzempfindlich.

- **Stroma corneae**

Das Stroma corneae macht etwa 90 % der Gesamtdicke der Hornhaut aus und ist aus Kollagenfibrillen und extrazellulärer Grundsubstanz aufgebaut. Im Gegensatz zu den Fasern der Membrana limitans anterior sind sie im Stroma corneae jedoch gleichmäßig parallel angeordnet und bilden dadurch zur Hornhautoberfläche parallel verlaufende Lamellen. Diese Struktur trägt zur Hornhauttransparenz bei. Zwischen den Lamellen befinden sich die Keratozyten, flache Zellen, die miteinander verbunden sind. Sie produzieren das Kollagen und die extrazellulären Bestandteile für das Stroma. In der innersten Stromaschicht bilden die Fibrillen eine Kollagenschicht, die zwischen Stroma corneae und Descemet-Membran liegt. Andere Zellen dieser Schicht sind u. a. Leukozyten, Makrophagen und Lymphozyten. Durch die fehlenden Gefäße regeneriert sich die Stroma corneae nur unzureichend.^{5,13}

- **Membrana limitans posterior (Descemet-Membran)**

Die Descemet-Membran ist die Basalmembran, worauf das Stroma gelegen ist. Sie hat von der anderen Seite her Kontakt mit dem darunter liegenden Endothel. Durch ihre ständige Zellneubildung wird die Membran im Laufe des Lebens dicker. Sie besteht aus einer vorderen und einer hinteren Lamelle. Die Membran

verfügt durch die Anordnung ihrer Kollagenfibrillen über elastische Eigenschaften.

- **Endothel**

Die innerste Schicht der Hornhaut ist das Endothel. Das Endothel besteht aus einer Monoschicht polygonaler Zellen, die wie ein Mosaik angeordnet sind. In jungen gesunden Augen haben die Endothelzellen eine Dichte von ca. 3000 Zellen/mm². Mit dem Alter verlieren wir an Endothelzellen und der jährliche Verlust liegt bei ca. 0,6 %. Die Zellen sind durch feste Anheftungsstellen, s.g. *tight junctions*, miteinander verbunden. Diese dienen als Barriere, sind jedoch durchlässig für Nährstoffe aus dem Kammerwasser. Pumpen im Endothel sorgen dafür, dass sich die Hornhaut in einem dehydrierten Zustand befindet, da dies für ihre Transparenz und normale Funktion obligat ist. Die zahlreich vorhandenen Endothelzellen können sich nicht teilen oder replizieren.⁴

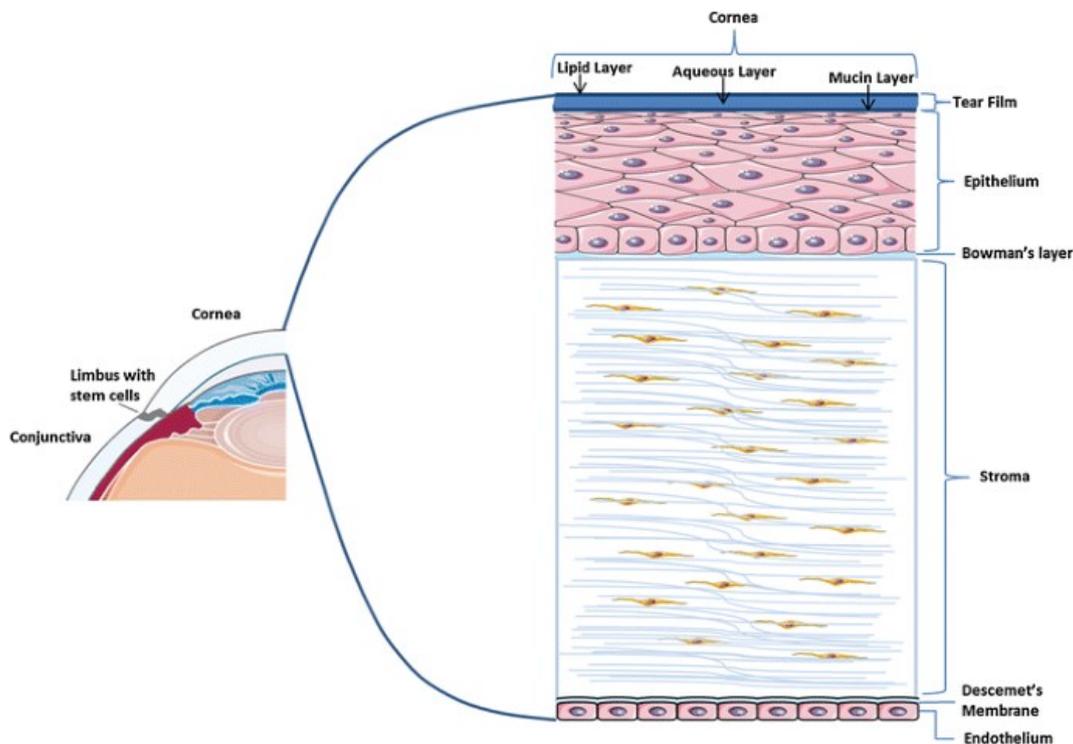


Abbildung 2: Aufbau der Hornhaut (Quelle: Springer)

1.2.2 Humor aquosus (Kammerwasser)

Das Kammerwasser ist eine transparente Flüssigkeit, die sich in der vorderen und hinteren Augenkammer befindet. Es besteht wie Blutplasma zu etwa 98 %

aus Wasser. Die restlichen 2 % bestehen aus Aminosäuren, Elektrolyten, Milchsäure, Ascorbinsäure (Vitamin C), Glutathion, Immunglobuline und Spuren von Wasserstoffperoxid. Das Kammerwasser versorgt zudem das Auge mit Nährstoffen und hält den Augeninnendruck des Auges relativ konstant bei durchschnittlich 15 mmHg.

1.2.3 Lens oculi (Linse)

Die Linse befindet sich hinter der Iris und trennt die vordere Augenkammer von der hinteren Augenkammer. Im jungen Alter ist sie klar. Sie ist bikonvex geformt und besitzt am Linsenäquator einen Durchmesser von etwa 9 mm. Im Bereich des Linsenäquators setzen die Zonulafasern des Ziliarkörpers an, die der Linse als Aufhängung dienen. Die Augenlinse wirkt physikalisch als Sammellinse. Die vordere Oberfläche weist eine geringere Krümmung als die hintere auf.^{10,11} Der vordere Pol (Polus anterior) ist direkt an die Iris (Regenbogenhaut) angelagert. Der hintere Pol (Polus posterior) ist in eine Einsenkung des Glaskörpers (Fossa hyaloidea) eingelassen. Die Linse kann als einziger Bestandteil des dioptrischen Apparates ihre Brechkraft variieren (Akkommodation). Dafür sind insbesondere die folgenden Faktoren verantwortlich: die Arbeit des Musculus ciliaris, die Zonulafasern und die elastischen Eigenschaften der Linse selbst. Die Akkommodation wird reflektorisch gesteuert. Bei Beobachtung eines Objektes in der Ferne spannen die Zonulafasern die Linse an, sodass sie flacher und dünner wird und ihre Brechkraft sinkt ab (s.g. Ferneinstellung). Für die Naheinstellung wird die aktive Arbeit des M. ciliaris benötigt. Bei seiner Kontraktion entspannen sich die Zonulafasern und die Linsendicke nimmt zu. Dadurch nehmen die Brechkraft und die Krümmung der Linse zu und wir sind in der Lage, ein nahegelegenes Objekt scharf zu stellen (s.g. Naheinstellung). Die Akkommodationsmöglichkeit ist nicht konstant und nimmt mit zunehmendem Alter ab.¹² Das Gewicht der Linse nimmt im Laufe des Lebens durch ständige Zellvermehrung zu (von ca. 130 mg auf ca. 250 mg).³ Der Linsenkörper besteht aus drei Anteilen: Linsenkapsel (Capsula lentis), Linsenepithel (Epithelium lentis) und Linsenfasern (Fibrae lentis) (s. Abb. 3).

- **Linsenkapsel**

Bei der Linsenkapsel handelt es sich um eine transparente halbdurchlässige Basalmembran, die durchlässig für niedermolekulare Substanzen ist. Die vordere Linsenkapsel ist dicker als die hintere, wobei die Dicke beidseitig mit fortschreitendem Alter zunimmt. An ihr setzen die Zonulafasern an. Die Linsenkapsel ist zu diesem Zweck mechanisch robust, kann jedoch gleichzeitig ihre Form bei der Akkomodation verändern.

- **Linsenepithel**

Direkt unter der Linsenkapsel befindet sich das Linsenepithel. Am Linsenäquator ist es durch bipolares Wachstum und Streckung charakterisiert und bringt die Linsenfasern hervor. Ältere Zellen der Rückseite wandern allmählich ins Zentrum der Linse und atrophieren dort. Sie bilden den Linsenkern (Nucleus lentis) aus. Im Laufe des Lebens steigt die Anzahl der ins Zentrum verlagerten Zellen, wobei weitere Schichten des Linsenkerns entstehen, die den einzelnen menschlichen Entwicklungsstadien (embryonal, infantil, jugendlich, erwachsen) entsprechen.

- **Linsenfasern**

Die Linsenfasern der Vorder- und Rückseite entwickeln sich jeweils gleichmäßig, sodass sie in einem Knotenpunkt am vorderen und hinteren Pol der Linse aufeinandertreffen und ein sternförmiges Gebilde hervorbringen. Die Linsenfasern sind miteinander verbunden, sodass sie sich nicht gegeneinander verschieben können, sondern nur die Krümmungsveränderung der Linse bewirken. Die zentralen älteren Linsenfasern enthalten keinen Zellkern mehr.

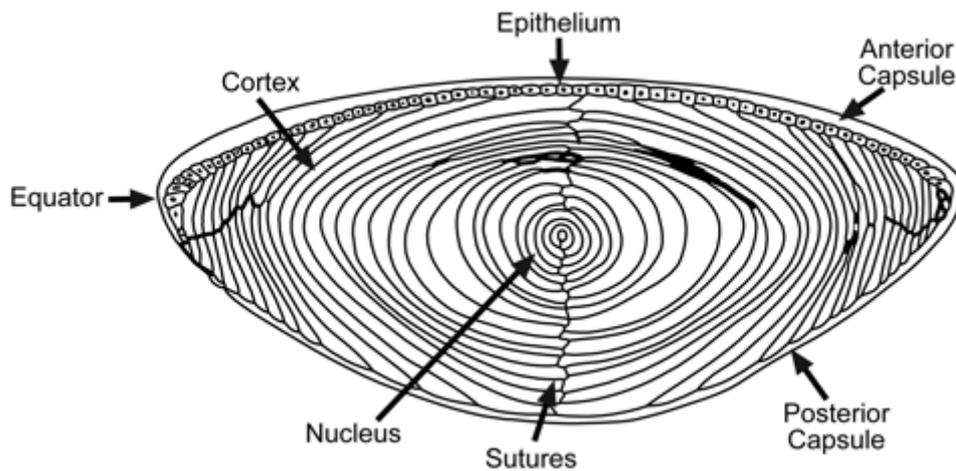


Abbildung 3: Struktur und Anatomie der menschlichen Linse (modifiziert nach Joan E. Roberts, Fordham University, Department of Natural Sciences)

1.2.4 Corpus vitreum (Glaskörper)

Der Glaskörper ist eine transparente, gelatinöse Masse. Er bewahrt bei der Entwicklung die Linse und die Netzhaut (Retina) vor Lageverschiebungen und stabilisiert das Auge. Der Glaskörper besteht hauptsächlich aus Wasser. Im Wasser ist Hyaluronat gelöst, das das Wasser bindet und damit ein molekulares Netz schafft. Zudem finden sich auch einige Makrophagen sowie ein lockeres Netz aus sehr dünnen Kollagenfibrillen vom Typ II. Sie bilden eine „Glaskörpergrenzmembran“, durch die der Glaskörper locker an die innere Oberfläche der Netzhaut angelagert ist. Lediglich im peripheren Bereich der Netzhaut, der s.g. Ora serrata, ist diese Anhaftung stärker.

1.3 Visuelle Wahrnehmung

Das Auge ist eines der wichtigsten Sinnesorgane des menschlichen Körpers. Die Augen übermitteln uns Informationen aus unserer Umgebung. Die eintreffenden Lichtstrahlen werden innerhalb der Netzhaut in elektrische Signale kodiert, verarbeitet, weitergeleitet und letztendlich in den Gehirnzentren analysiert. Die Lichtstrahlen fallen durch die Hornhaut (Cornea) des Auges über Pupille, Linse und Glaskörper auf die Netzhaut (Retina). Die Hornhaut ist das erste Medium, das das Licht bricht. Dann gelangt die Lichtwelle durch die

Vorderkammerflüssigkeit und wird durch die Linse gebündelt. Die Lichtwelle wandert durch den dahinterliegenden Glaskörper und trifft auf die Retina. Dort werden die Lichtwellen in elektrische Erregungen umgewandelt. Dazu verarbeiten die bipolaren Nervenzellen auf der Retina die Informationen der Fotorezeptoren und geben diese an die Ganglienzellen weiter. Die Gesamtheit der Ganglienzellen bilden den Sehnerv (N. Opticus). Die Axone der Ganglienzellen ziehen zum Chiasma opticum. Dort kreuzen die aus der nasalen Retinahälfte stammenden Fasern (also dem temporalen Gesichtsfeld) zur Gegenseite und ziehen mit den ungekreuzten Sehnervfasern des anderen Auges im Tractus opticus zum Corpus geniculatum laterale. Von den Corpora geniculata laterales gelangen die Fasern über die Radiatio optica zum medialen Teil des Occipitallappens des Gehirns (Area striata). Die Area striata stellt eine retinologische Karte des Gesichtsfeldes dar. Dort befindet sich der primäre visuelle Kortex, der in der Neuroanatomie als V1 bekannt ist. Die Information aus dem primären visuellen Kortex wird an die zugehörigen kortikalen Zentren gesendet, die als extrastriate visuelle Bereiche bezeichnet werden, in denen die endgültige Verarbeitung der Sehperzeption stattfindet.¹³

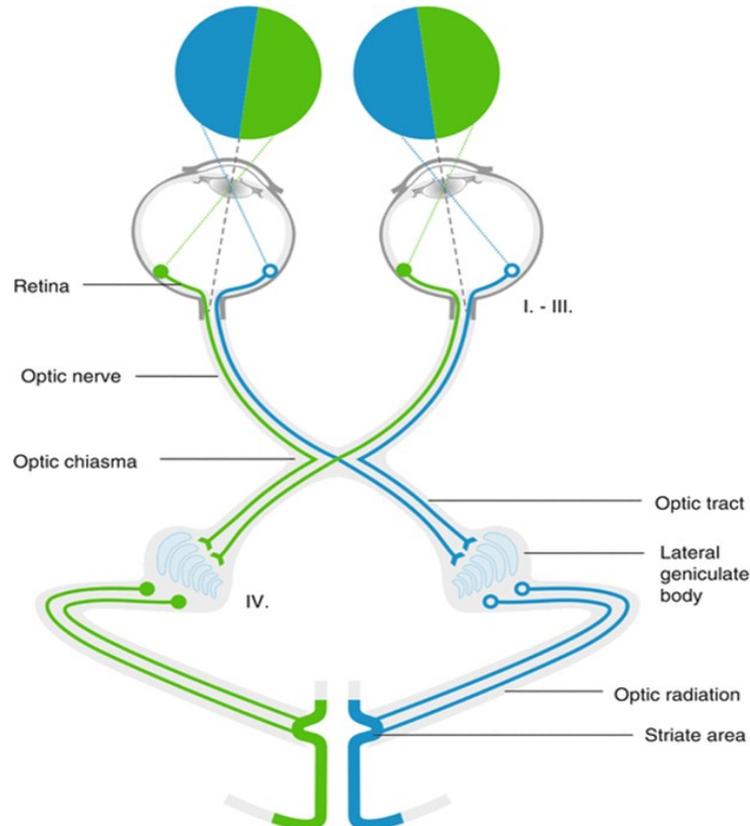


Abbildung 4: Visuelle Wahrnehmung (Anatomy of the Human Visual Pathway, Marek Joukal, Springer)

1.4 Akkommodationsstörungen

Eine gestörte Akkommodation führt dazu, dass das beobachtete Objekt nicht scharf auf der Netzhaut abgebildet werden kann. Mit zunehmendem Alter wird die Linse weniger elastisch und verliert gleichzeitig ihre Akkommodationsfähigkeit. Anders gesagt: Ihre Akkommodationsbreite verringert sich.^{10,11,14} Zur Akkommodationsstörung können auch verschiedene Medikamente (Atropin, Scopolamin, Butylscopolamin oder Cholinergika) oder Erkrankungen (z. B. Diabetes mellitus) führen.

1.4.1 Presbyopie (Alterssichtigkeit)

Diese Veränderung ist ein physiologischer Prozess und tritt meist im Alter von 40–45 Jahren auf. Bei der Presbyopie verliert die Linse ihre Anpassungsfähigkeit und Elastizität. Bei Kontraktion des Musculus ciliaris kann sie sich nicht mehr ausreichend abrunden. Das bedeutet, dass sie das Licht weniger stark brechen kann. Der Fernpunkt bleibt dabei unverändert, der Nahpunkt wird jedoch nicht mehr scharf abgebildet.¹⁵ Zur Korrektur der Presbyopie wird eine Lesebrille (Brille mit Plusgläsern), die als Sammellinse das Licht bricht, verordnet.

1.5 Refraktionsanomalien

Die Refraktionsanomalien entstehen entweder durch eine Ametropie*, ein Missverhältnis zwischen der Brechkraft der Linse und der Bulbuslänge, oder durch sonstige Störungen der Lichtbrechung in Komponenten des dioptrischen Apparats. Zu den häufigsten Refraktionsanomalien zählen Myopie, Hyperopie und Astigmatismus.

**Ametropie: Das ist der Sammelbegriff für alle Formen der Fehlsichtigkeit, die durch Refraktionsanomalien und/oder Achsenlängeänderungen verursacht werden.*

1.5.1 Myopie (Kurzichtigkeit)

Der Brennpunkt des optischen Systems des kurzsichtigen Auges liegt vor der Netzhaut und parallel fallende Strahlen schneiden sich zu früh, d. h. im Glaskörperraum. Blickt ein unkorrigierter Patient mit Myopie in die Ferne, gelangen deshalb divergente Strahlen auf die Netzhaut, die zu einem unscharfen Bild führen. Das kann, wie bei oben genannter Abweichung, zwei Gründe haben: Brechungs- und Achsenmyopie. Als Brechungsmyopie bezeichnet man eine Myopie, bei der durch zu starke Brechung des Lichtstrahles der Brennpunkt vor der Netzhaut erscheint. Bei der Achsenmyopie ist der Augapfel zu lang und trotz normaler Brechung des Lichtes durch die brechenden Medien liegt der Brennpunkt vor der Netzhaut.

1.5.2 Hyperopie (Weitsichtigkeit)

Der Brennpunkt des optischen Systems des hyperopen (weitsichtigen) Auges liegt hinter der Netzhaut. Auch hier liegt die Ursache entweder in einem Missverhältnis der Brechkraft des optischen Systems oder in der Achsenlänge (Brechungs- bzw. Achsenhyperopie). Als Brechungshyperopie bezeichnet man die Hyperopie, bei der durch zu schwache Brechung des Lichtstrahles der Brennpunkt hinter der Netzhaut erscheint. Bei der Achsenhyperopie ist der Augapfel zu kurz und trotz normaler Brechung des Lichtes durch die brechenden Medien liegt der Brennpunkt hinter der Netzhaut.

1.5.3 Astigmatismus (Hornhautverkrümmung)

Der Astigmatismus, die s.g. Stabsichtigkeit, ist einer der häufigsten Refraktionsfehler und tritt sogar in manchen Ländern häufiger als Myopie und Hyperopie auf. Laut des epidemiologischen Berichtes von Williams¹⁶ leiden 27 % der Bevölkerung Europas an einem über ein Dioptr starken Astigmatismus. Man unterscheidet in der Regel zwischen Hornhaut- und Linsenastigmatismus. Der Hornhautastigmatismus (cornealer Astigmatismus) ist deutlich häufiger und dadurch von größerer Bedeutung.

Durch eine Fehlkrümmung der Hornhautvorder- oder rückfläche können parallel einfallende Lichtstrahlen nicht punktförmig auf der Netzhaut abgebildet werden, wodurch ein verzerrtes Bild entsteht. Beträgt der Astigmatismus weniger als 0,5 D, beeinträchtigt er die unkorrigierte Sehschärfe kaum.¹⁷ Führt der Astigmatismus jedoch zu einer subjektiv und klinisch relevanten Visuseinschränkung, kann er korrigiert werden (s. Kap. 1.5.4).

Der korneale Astigmatismus kann nach Regularität, Ausprägung und nach Lage des steilen Meridians unterteilt werden. Die Regularität wird in regulär und irregulär unterteilt. Ein regulärer Astigmatismus umfasst eine Hornhautkrümmung mit der Regel, gegen die Regel und oblique, je nach Ausrichtung der Hauptschnitte (Hauptmeridiane*).

Die optische Summierung des Astigmatismus der Vorder- und Hinterfläche der Hornhaut wird als refraktiver Astigmatismus bezeichnet. Der posteriore Hornhautastigmatismus ist tendenziell eher ein Astigmatismus gegen die Regel wodurch er einen anterioreren Hornhautastigmatismus mit der Regel antagonisiert und einen anterioreren Hornhautastigmatismus gegen die Regel verstärkt (s. Abschnitt Regulärer Astigmatismus).

Meridian des Auges:* Betrachtet man das Zentrum der Pupille als einen Pol, so werden imaginäre Linien um den Augapfel gezogen, die sich an den Polen (sowohl anterior als auch posterior) schneiden und als Meridiane des Auges bezeichnet werden. Die flachsten und steilsten Meridiane des Auges werden als Hauptmeridiane* bezeichnet.

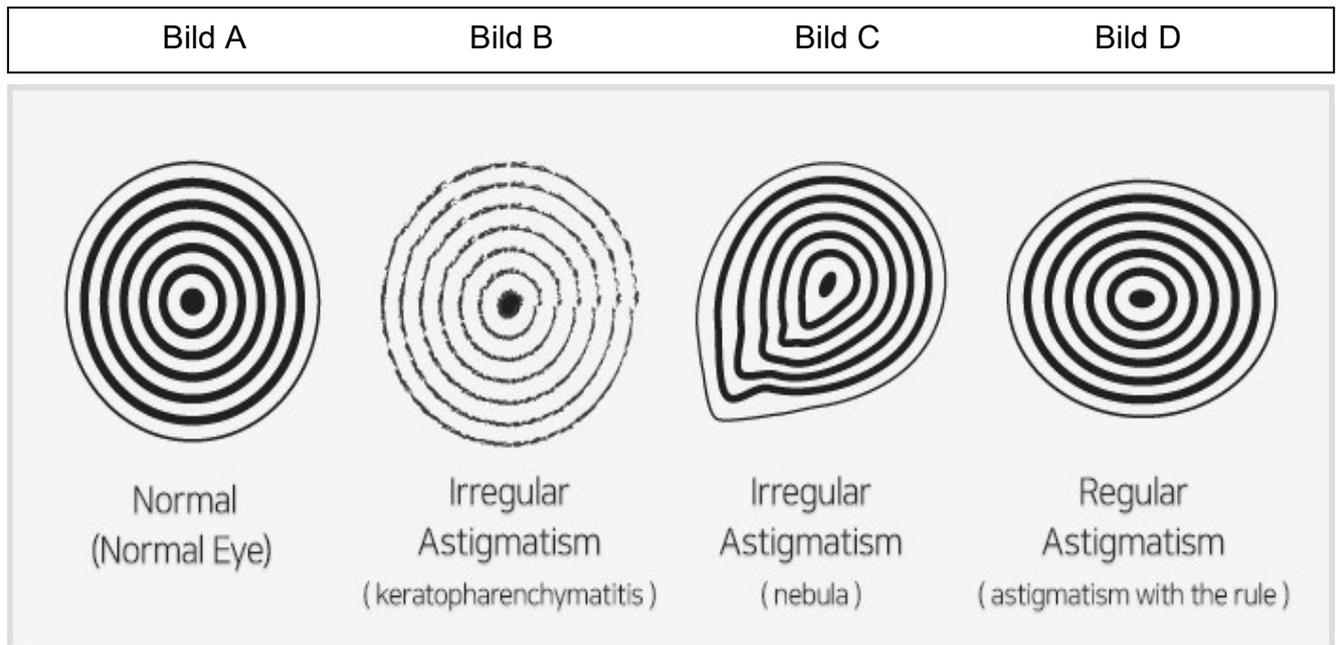


Abbildung 5: Astigmatismenformen (modifiziert nach der Abbildung von Dr. David Kang)

- **Regulärer Astigmatismus**

Bei einem regulären Astigmatismus ist die Hornhautoberfläche gleichmäßig gekrümmt, bricht aber das Licht unterschiedlich stark in den zwei senkrecht aufeinander stehenden Hauptmeridianen.³ Das bedeutet, dass die horizontale Achse der Hornhaut nicht die gleiche Krümmung aufweist wie die vertikale. Es entsteht kein Brennpunkt wie bei Normalsichtigen, sondern zwei senkrecht zueinanderstehende Brennlinien (s. Abb. 5, Bild D). Der reguläre Astigmatismus kann „mit der Regel“, „gegen die Regel“ und „oblique oder schräg“ sein. Er wurde lange Zeit als zweidimensionales Phänomen betrachtet, da nur die Vorderfläche der Hornhaut dargestellt und gemessen werden konnte. Neue Untersuchungstechniken und damit Darstellungsmethoden der Hornhaut (Tomo- und Topographie*) erlauben uns nun die Darstellung der Vorderfläche, als auch der Hinterfläche der Hornhaut und damit eine dreidimensionale Betrachtungsweise.^{18–20}

Tomographie und Topographie der Hornhaut:* Diese Begriffe bezeichnen die Abbildung und Ausmessung der Hornhautdicke und die Stärke der Hornhautverkrümmung in den verschiedenen Bereichen. Oft wird die Hornhautoberfläche bzw. -hinterfläche wie eine Landkarte dargestellt.

a) Astigmatismus mit der Regel („with-the-rule“, WTR):

Der steile Meridian liegt bei $\pm 90^\circ$. Diese Art von Astigmatismus kommt häufig bei Kindern und jüngeren Menschen vor.

b) Astigmatismus gegen die Regel („against-the-rule“, ATR):

Hier ist der horizontale Meridian steiler als der vertikale Meridian (steiler Meridian bei $\pm 180^\circ$). Diese Form ist bei älteren Menschen häufiger.

c) Schräger Astigmatismus („oblique“, OBL):

Wenn die Hauptmeridiane nicht bei 90° und 180° liegen, wird der Astigmatismus als schräger Astigmatismus kategorisiert. Die Hauptmeridiane liegen zwischen 30° – 60° und 120° – 150° .

• Irregulärer Astigmatismus

Bei diesem Typ ist die Krümmung an jedem Meridian nicht gleichmäßig, sondern ändert sich von einem Punkt der Hornhaut zum anderen (s. Abb. 5, Bild B, C). Ein irregulärer Astigmatismus, der klinisch relevant ist, ist im Vergleich zur regulären Form sehr selten. Der irreguläre Astigmatismus tritt bei Patienten nach Hornhautverletzungen, Entzündungen oder bei Hornhautdegenerationen* auf. Die häufigste natürliche Ursache für irregulären Hornhautastigmatismus ist der Keratokonus*. Ein chirurgisch induzierter Astigmatismus kann u. a. durch eine Kataraktoperation, Pterygiumexzision*, Keratoplastik*, astigmatische Keratektomie* oder durch refraktive Laserchirurgie* auftreten.²⁰

Keratokonius: eine Hornhauterkrankung, bei der eine fortschreitende Aufsteigung und Vorwölbung der Hornhaut v.a. im inferioren Bereich der Hornhaut beobachtet wird. Die Progression der Erkrankung ist mit einer Ausdünnung der Hornhaut vergesellschaftet und zur Vorbeugung einer Perforation des Gewebes wird eine Hornhauttransplantation durchgeführt. Die Erkrankung ist einer der häufigsten Gründe für eine Hornhauttransplantation.*

Pterygium: ist eine degenerative Erkrankung der Bindehaut, bei der sich am häufigsten der nasale Teil der Bindehaut unter der Wirkung von UV-Strahlung verändert und auf die Hornhaut übergreifend wächst.*

*Astigmatische Keratotomie**: ist ein operatives Verfahren zur Reduktion des Astigmatismus. Bei dem Eingriff werden im Bereich der stärksten Hornhautwölbung bogenförmige Schnitte gesetzt. Durch diese Entlastungsschnitte kann sich die Hornhaut abflachen und die Unregelmäßigkeit der Hornhautkrümmung wird vermindert.

*Refraktive Laserchirurgie**: ist ein Sammelbegriff, der alle hornhautchirurgischen Operationen zur Korrektur von refraktiven Fehlern in der Augenheilkunde beschreibt. Damit wird in der Regel eine Brillenfreiheit erzielt.

1.5.4 Möglichkeiten der Astigmatismuskorrektur

Während eine konservative Korrektur bei niedrigeren Astigmatismuswerten mittels Brille möglich ist, sind höhere Astigmatismuswerte und gewisse Hornhautirregularitäten durch Kontaktlinsen besser auszugleichen. Bei Hornhautirregularitäten eignen sich formstabile Kontaktlinsen. Heutzutage bietet die Augenheilkunde auch viele verschiedene hornhautoperative Möglichkeiten zur Korrektur des Astigmatismus, beispielsweise die PRK (Photorefraktive Keratektomie), die FSAK (femtosekundenlaserassistierte Keratotomie), die LASIK (Laser-in-situ- Keratomileus), SMILE (laser lenticule extraction) oder die Implantation von phaken torischen IOL (s.g. ICL) vor die natürliche Linse.^{19,21,22}

Eine weitere Korrekturmöglichkeit des Astigmatismus ist der Austausch der natürlichen Linse gegen eine torische Kunstlinse. Laut Literatur 20–30 % der Patienten, die zur Kataraktoperation vorstellig werden, haben einen Astigmatismus > 1,25 D und 10 % davon > 2,0 D.^{23,24} In diesen Fällen ist eine Korrektur des Astigmatismus mittels torischen Intraokularlinsen (tIOL) sinnvoll. Mittlerweile sind viele verschiedene torische IOLs auf dem Markt, darunter auch multifokale Varianten. Letztere zielen auf eine postoperative Brillenunabhängigkeit des Patienten ab. Für ein optimales Ergebnis nach der Kataraktoperation mittels einer torischen Linse spielt die präoperative Kalkulation der Stärke der intraokularen Linse (IOL) eine entscheidende Rolle. Studien haben gezeigt, dass für die Berechnung der IOL sowohl der Astigmatismus der vorderen und hinteren Hornhautfläche als auch der chirurgisch induzierte Astigmatismus bei der Kalkulation der IOL berücksichtigt werden sollte.^{25,26}

1.6 Katarakt

Das altgriechische Wort „Cataracta“ bedeutet „herabstürzend“. Der Mechanismus der Kataraktentstehung ist mit der Aggregation von Proteinen in der natürlichen Linse (Lens cristalina) verbunden.²⁷⁻²⁹

Die altersbedingte (senile) Katarakt (im deutschsprachigen Raum umgangssprachlich als „Grauer Star“ bezeichnet) ist durch eine physiologische Veränderung der Linse, die mit Fortschreiten des Alters des Menschen vorkommt, bedingt. Dieser Prozess der Eintrübung der natürlichen Linse geht mit zunehmender Linsendicke und Verlust der Akkommodationsfähigkeit der Linse einher.

Die einzige Behandlungsmöglichkeit ist die operative Entfernung der eingetrübten Linse und darauffolgende Implantation einer Kunstlinse.²⁷⁻²⁹

1.6.1 Epidemiologie der Katarakt

Genauere Zahlen über die Häufigkeit der Katarakt in Deutschland liegen aktuell nicht vor. In einer epidemiologischen Studie in Nord-London sind 30 % der Bevölkerung im Alter von über 65 Jahren von einer Einschränkung der Sehkraft aufgrund einer Katarakt in einem oder beiden Augen betroffen.³⁰ Die Prävalenz einer Einschränkung der Sehkraft aufgrund einer Katarakt nimmt mit dem Alter zu (16 % bei 65- bis 69-Jährigen; 24 % bei 70- bis 74-Jährigen; 42 % bei 75- bis 79-Jährigen; 59 % bei 80- bis 84-Jährigen; 71 % bei über 85-Jährigen). Es wurde geschätzt, dass bei den 65- bis 75-Jährigen über die Hälfte der Menschen in unterschiedlichem Ausmaß von einer Katarakt betroffen sind.^{27,31} Ab dem 75. Lebensjahr nimmt die Hälfte dieser Personen auch Beeinträchtigungen des Sehvermögens wahr. Die Klassifikation der Katarakt erfolgt anhand ihrer Morphologie, dem Stadium und der Ursache. Eine Linsentrübung, die als isolierte Erkrankung auftritt, nennt man „*primäre Katarakt*“. Ist sie die Folge einer Erkrankung (Diabetes oder Speichererkrankung) oder tritt sie nach der Einnahme von Medikamenten (z. B. Kortison) oder nach einer Augenverletzung (traumatische Katarakt) auf, bezeichnet man sie als „*sekundäre Katarakt*“.

1.6.2 Klassifikation der Katarakt

Morphologie der Katarakt

Die morphologische Einteilung der Katarakt erfolgt anhand der Lokalisation der Trübung.

- Bei der **Cataracta corticalis** (Rindenkatarakt) kommt es durch sogenannte Wasserspalten (bzw. flüssigkeitsgefüllte Vakuolen) zu Trübungen in der Linsenrinde. Etwa 50 % der altersbedingten Linsentrübungen beginnen mit diesem Trübungsmuster.³²
- Die Form der **Cataracta subcapsularis anterior et posterior** (vordere oder hintere subkapsuläre Katarakt) macht statistisch etwa 20 % aller Katarakte aus. Bei dieser Form bemerkt der Patient eine rasche Verschlechterung der Sehschärfe, weil die optische Achse betroffen ist.
- Die **Cataracta nuclearis** (Kernkatarakt) ist langsam fortschreitend. Es kommt zu einer bräunlichen Trübung, einhergehend mit einer Zunahme der Brechkraft und einer hieraus resultierenden Myopisierung (s. Kap. 1.5.1). Ist ein Patient bereits alterssichtig, so kann es nun für vorübergehende Zeit zu einer Verbesserung der Sehschärfe in der Nähe kommen, sodass die Lesebrille nicht gebraucht wird. Im weiteren Verlauf können monokulare Doppelbilder auftreten, weil die Kerntrübung das ins Auge eindringende Licht unregelmäßig bricht.

Kataraktstadien

- **Cataracta incipiens (beginnende Katarakt):** Dies ist ein Grauer Star, der bei der Untersuchung mit einer Spaltlampe gesehen wird, aber von geringer klinischer Bedeutung ist. Bei dieser Form berichtet der Patient über Sehbeschwerden wie vermehrte Blendung und Kontrastreduktion, kann aber trotz der beginnenden Linsentrübung eine gute Sehschärfe haben.

- **Cataracta provecta (fortgeschrittene Katarakt):** Diese ist eine Kataraktform, die durch eine unterschiedlich starke Trübung gekennzeichnet ist und in bestimmten Bereichen der Linse auftritt. Dazu können sowohl Bereiche mit hoher als auch mit niedriger Dichte der Trübung gehören. Der Patient kann Buchstaben lesen und seine Sehschärfe besträgt in der Regel zwischen 0,1–0,63 korrigiert.
- **Cataracta matura (reife Katarakt):** In diesem Stadium der Katarakt ist die Linse komplett trüb und der rote Reflex durch die Netzhaut kann nicht beobachtet werden. Die Farbe der Linse ist meistens entweder weiß oder braun und die Sehschärfe ist bedeutsam reduziert.^{3,4}

1.7 Karataktooperation

Die Kataraktoperation ist ein Eingriff, zu dem es keine relevante Behandlungsalternative gibt. Die Kataraktoperation ist nach den intravitrealen Spritzen (s.g. IVOMs) die zweithäufigste Augenoperation in Deutschland und laut Berichten der Ophthalmochirurgen lassen sich in Deutschland jährlich über 800.000 Menschen am Grauen Star operieren. Nur ein relativ geringer Anteil dieser Operationen (ca. 12 %) wird stationär durchgeführt.³³

1.7.1 Historische Entwicklung der Kataraktchirurgie

Eine rasche und beeindruckende Entwicklung erlebt die Kataraktchirurgie nach dem Zweiten Weltkrieg und nach der Erfindung der ersten künstlichen Linse von Harold Ridley 1949. Der Starstich (Couching) wurde jedoch bereits in der Antike durchgeführt.

- **Couching**

Die früheste bekannte Methode der Behandlung eines Grauen Stars ist der sogenannte Starstich, der bis ins achte Jahrhundert v. Chr. zurückreicht. Das Procedere wird auf Englisch „*Couching*“ genannt und kommt aus dem Französischen, wo das Verb „*coucher*“ „*ins Bett bringen*“ bedeutet. Der Starstich wurde typischerweise bei Vorliegen einer Cataracta matura durchgeführt. Hierbei

wurde die Linse nicht aus dem Auge entfernt, sondern ihr Halteapparat mit einer scharfen Nadel durchtrennt. Danach wurde die eingetrübte Linse in den Glaskörperraum gedrängt, sodass sie nicht mehr den Weg der Lichtstrahlen zur Netzhaut blockierte.³⁴ In der unmittelbaren postoperativen Phase wurden sehr häufig schwere Komplikationen beobachtet, die häufig zum vollständigen Visusverlust führten. Leider ist die Methode in einigen Entwicklungsländern noch immer die einzige operative Option. Da bei dieser Operation keine künstliche Linse implantiert wird, müssen die Patienten eine sogenannte Starbrille (ca. 12,0 bis 18,0 Dioptrien) tragen, die die fehlende Brechungsstärke der Linse ausgleicht.

- **ICCE (intrakapsuläre Linsenextraktion)**

Am 8. April 1747 entfernte der französische Augenchirurg Jacques Daviel zum ersten Mal bei einem Patienten die getrübte Linse samt dem Kapselsack durch eine größere Inzision aus dem Auge und führte damit die erste intrakapsuläre Linsenoperation durch. Bei der intrakapsulären Linsenextraktion wird über einen 9–11 mm langen korneoskleralen Schnitt die Linse als Ganzes mit ihrer Linsenkapsel aus dem Auge entfernt, wobei ihr Halteapparat, also die Zonulafasern, zerstört werden. Meist erfolgt anschließend die Implantation einer künstlichen Linse in die Vorder- oder Hinterkammer mit Befestigung an der Iris. Die Entfernung der Linse mitsamt der Kapsel führt zu einem Verlust der Barrierefunktion zwischen vorderem und hinterem Augenabschnitt. Somit kann der Glaskörper nach anterior prolabieren und es kann zu weiteren Komplikationen wie beispielsweise einer retinalen Ablösung, Makulaödem, Hornhautdekomensation, Glaukomentwicklung oder einer massiven Blutung kommen.³⁵ Bedingt durch die hohe Komplikationsrate und mit Aufkommen der sicheren extrakapsulären Operationstechnik (ECCE) nahm die Popularität der ICCE ab.

- **ECCE (extrakapsuläre Linsenextraktion)**

Bei dieser Operationsmethode wird nur ein Teil der vorderen Linsenkapsel entfernt, während die restliche Kapsel und die Zonulafasern intakt bleiben. Über die vordere Kapsellücke kann der Operateur den Linsenkern und die -rinde entfernen und die Kunstlinse implantieren. Je nach Form der anterioren Kapsulotomie sowie der Entfernung des Linsenkerns und der Irrigation-Aspiration

des Kortex lassen sich verschiedene Arten von ECCE-Methoden (konventionelle ECCE-Technik, MSICS* und Phakoemulsifikation*) unterscheiden.¹

Die konventionelle ECCE-Technik bezieht sich auf ein Verfahren, bei dem der intakte Linsenkern durch einen limbalen Schnitt mit einer Länge von ca. 10 mm aus dem Auge entfernt wird. In den Industrienationen ist heutzutage die Phakoemulsifikation der Goldstandard in der Kataraktchirurgie.

* *MSICS: manuelle Kataraktchirurgie mit kleinen Schnitten*

**Phakoemulsifikation: s. Kap. 1.7.2*

1.7.2 Phakoemulsifikation

Diese Operationsmethode gehört zu den ECCE-Techniken und stellt die Standardmethode bei der Kataraktoperation heutzutage dar. Hierbei wird die getrübe Linse mittels Ultraschallenergie im Kapselsack zerkleinert und anschließend abgesaugt. Der Vorteil ist, dass die erforderlichen Hornhautschnitte viel kleiner sind und sich auch ohne Naht abdichten lassen. Nach Entfernung aller Komponenten des Kapselinhalts bleibt der Rest des Linsenkapselsackes ähnlich wie eine leere Tasche. Der restliche Kapselsack dient zusammen mit den Zonulafasern als Halteapparat für die künstliche Linse. Dort wird mithilfe eines Injektors im nächsten Schritt der Operation die künstliche IOL implantiert. Es existieren viele unterschiedliche Operationstechniken: Der Hauptschnitt kann superior (bei 12 Uhr) oder temporal gelegt werden. Der Hornhautastigmatismus kann durch die richtige Schnittposition reduziert werden. Im Heilungsprozess kommt es an der Schnittstelle zu einer Relaxation des Hornhautgewebes und die Krümmung der Hornhaut reduziert sich. Die neuesten Zugangstechniken zielen auf Inzisionen kleiner als 2 mm ab. Hierzu bedarf es allerdings sehr feiner Operationsinstrumente und spezieller faltbarer Intraokularlinsen (IOL).^{33,36,37} Die moderne Phakoemulsifikation erfolgt heutzutage in lokaler Anästhesie und meist unter ambulanten Bedingungen.^{38,39}

1.7.3 Femtosekundenlaserassistierte Kataraktoperation

Im englischsprachigen Raum wird das Verfahren als FLACS (femtosecond laser-assisted cataract surgery) abgekürzt. Bei der femtosekundenlasergestützten Kataraktoperation werden die erforderlichen Hornhautschnitte, die Eröffnung der vorderen Linsenkapsel und die Zerkleinerung der Linse – anstatt manuell vom Ophthalmochirurgen – mit dem Femtosekundenlaser durchgeführt. Hierdurch wird die vordere Linsenkapsel präzise eröffnet und es wird weniger Ultraschallenergie zur Linsenzerkleinerung gebraucht. Daher gilt das Verfahren als präziser und schonender für das Hornhautendothel.⁴⁰ Die FLACS ist aktuell die modernste Operationsmethode unter den Kataraktoperationen. Obwohl keine besseren Visusergebnisse im Vergleich zu der konventionellen Phakoemulsifikation publiziert wurden, wird diese Methode besonders bei Implantation einer Premiumlinse (Linse mit torischer oder multifokaler Optik) aufgrund ihrer Präzision bevorzugt.^{40–43} Die einzelnen Schritte der femtosekundenlasergestützten Kataraktoperation werden im Abschnitt 3.4 ausführlich erklärt.

1.7.4 Refraktiver Linsenaustausch (RLA)

Mit diesem Begriff bezeichnet man den operativen Austausch der physiologischen Linse, welche gar nicht oder kaum getrübt ist, und damit nicht den Kriterien einer Katarakt entspricht. Das weitere Vorgehen, wie der Einsatz einer Kunstlinse, entspricht dem der grauen Star Operation. Das Ziel dieser Operation ist eine refraktive Korrektur zur weitestgehenden Brillenunabhängigkeit. Der RLA wird besonders häufig bei Patienten mit höheren Ametropiewerten, bei dünner Hornhaut, bei flacher Vorderkammer oder wenn für andere refraktive Eingriffe eine Kontraindikation besteht, durchgeführt.^{44–46} Durch den Einsatz einer Kunstlinse geht die Akkommodationsfähigkeit der physiologischen Linse verloren, sodass diese Operationsmethode insbesondere ab dem 45-50 Lebensalter nützlich ist, wenn die körpereigene Linse durch die Presbyopie die Nahakkommodation verloren hat. Es besteht die Option, die Kunstlinse auf eine bestimmte Arbeitsdistanz zu berechnen oder eine multifokale Linse zu implantieren, um dadurch eine postoperative Brillenunabhängigkeit zu erreichen (s. Abschnitt 1.8.3).

1.8 Intraokularlinsen

Die Intraokularlinse ist ein Implantat aus Kunststoffmaterial, das die natürliche Linse ersetzt. Sie bündelt das Licht auf die Netzhaut und erspart dem Patienten die Korrektur mit einer Starbrille. Innerhalb der letzten Jahrzehnte haben sich die Eigenschaften dieser Linsen stetig verbessert. Bisher ist die Herstellung einer akkommodativen IOL trotz intensiver Forschung nicht gelungen. Die u. g. Aufteilung der Linsenentwicklung in Generationen basiert auf der Publikation von Prof. Gerd Auffarth „Zur Entwicklungsgeschichte der Intraokularlinsen“.⁴⁷

1.8.1 Entwicklung der Intraokularlinsen

Die erste erfolgreiche moderne Intraokularlinse wurde im Jahr 1949 implantiert. Die Entwicklung verschiedener Linsen mit verbessertem optischen System hat bis dato keinen Endpunkt erreicht.^{47,48}

- **Erste Generation von Intraokularlinsen**

Die Zeit von der ersten Implantation einer Intraokularlinse von 1949 bis Mitte der 50er-Jahre wurde als Generation I der Entwicklung der Intraokularlinsen bezeichnet. Das Material der ersten Intraokularlinsen bestand aus Polymethylmethacrylat (PMMA). Der Ophthalmochirurg Sir Harold Ridley ist auf die Idee gekommen, dieses Material zu verwenden, nachdem er viele Piloten nach perforierenden Augenverletzungen beobachtet hatte, die keine ausgeprägte Fremdkörperreaktion auf den PMMA-Splitter (Plexiglassplitter) entwickelten. So wurden die ersten Intraokularlinsen aus PMMA hergestellt. Die erste Intraokularlinse hatte eine bikonkave Form, verfügte aber über keinen eigenen Halteapparat (Optik ohne Haptik). Die Operation mit Implantation einer solchen Linse verlangte einen viel größeren Schnitt, weil die Kunstlinse nicht faltbar war. Da in dieser Zeit noch keine Kenntnisse über die Berechnung der Intraokularlinsenstärke vorlagen, richtete sich seine Kalkulation nach den Dimensionen der natürlichen Linse. Dadurch kam es zu hohen postoperativen Refraktionsfehlern. Sir Harold Ridley berichtete über seine Implantationen auf dem Oxford Ophthalmology Congress im Juli 1951.

- **Zweite Generation von Intraokularlinsen**

Auf der Suche nach einem effektiven Befestigungsapparat wurde die zweite Generation der Intraokularlinsen entwickelt. In dieser Phase entstanden vom Anfang der 50er-Jahre bis zum Beginn der 60er-Jahre die Vorderkammerlinsen. Die Hoffnung der Ophthalmochirurgen bestand darin, mit den Vorderkammerlinsen weniger Luxationen der Linse zu haben, weil die Linse im Kammerwinkel fixiert bleibt. Des Weiteren konnten sie Vorderkammerlinsen sowohl nach extrakapsulärer als auch nach intrakapsulärer Kataraktextraktion implantieren. Die Implantation erfolgte gewöhnlich schneller als die Implantation einer Hinterkammerlinse. Trotz ständiger Optimierung des Designs der Linse und deren Haptik traten postoperativ häufig Hornhautdekomensationen auf.

- **Dritte Generation von Intraokularlinsen**

Dieses Modell der Intraokularlinse wurde vor der Pupille mit spezieller Haptik an der Iris (Regenbogenhaut) befestigt. Solche irisfixierten Linsen wurden bereits 1953 von Epstein in Südafrika entwickelt und implantiert. Bei allen Linsen dieser Generation kam es postoperativ zu ausgeprägten Iripigmentdefekten durch Reibung der Linse am Pigmentblatt der Iris und darauffolgenden Komplikationen wie Pigmentdispersions-glaukom (PEX-Glaukom) und Hornhautablagerungen.

- **Vierte Generation von Intraokularlinsen**

Die Linsen dieser Generation waren auch Vorderkammerlinsen. Es kam in den 60er- und 70er-Jahren sowie zu Beginn der 80er-Jahre zu einer Weiterentwicklung der Vorderkammerlinsen. Es wurden die starren und semistarren Vorderkammerlinsen entwickelt. Im Vergleich zu den frühen Vorderkammerlinsen wurden Herstellung, Design und Linsenoberfläche deutlich verbessert. Die Mehrheit der Linsen der vierten Generation verursachten häufig das UGH-Syndrom (Uveitis, Glaukom, Hyphäma).

- **Fünfte Generation**

Ende der 70er entstanden die ersten faltbaren IOLs durch die Benutzung eines neuen Materials: Silikon. Im Jahr 1977 stellt Shearing eine Hinterkammerlinse mit offenen J-Haptiken vor. In den folgenden Jahren wurden viele

Veränderungen an den Haptiken vorgenommen. Modifizierte J- und C-Haptiken mit unterschiedlichen Längen und Gesamtdurchmessern wurden entwickelt.

Die Ophthalmochirurgen sahen, dass der natürliche Kapselsack ein sicherer Implantationsort für die Kunstlinse ist. Es wurden nun einstückige PMMA-Hinterkammerlinsen speziell für die Implantation in den Kapselsack entwickelt.

- **Sechste Generation von Intraokularlinsen**

Zu dieser Gruppe werden die gegenwärtigen IOL-Implantate gezählt. Für die Ophthalmochirurgen steht eine Vielzahl von Intraokularlinsen zur Verfügung, die bei verschiedenen medizinischen Indikationen implantiert werden können. Es wird eine Aufteilung anhand des Ziels der Linsenoperation gemacht. So unterscheiden wir heute drei große Bereiche der Intraokularlinsen Chirurgie: Standardkataraktchirurgie, spezielle Linsen Chirurgie und refraktive Linsen Chirurgie. (s. Abschnitt 1.10, 1.11)

1.8.2 IOL Material

- **Polymethylmethacrylat (PMMA)**

PMMA war das erste Material, das für IOLs verwendet wurde. Es ist ein starres, nicht faltbares und hydrophobes Material. Es hat einen geringen Wassergehalt (< 1 %) und einen Brechungsindex von 1,49. Aufgrund der erforderlichen großen Inzision werden die PMMA-IOLs heute selten benutzt. Manche spezielle Linsen, wie beispielsweise Vorderkammerlinsen oder Aphakielinsen* (Artisan bzw. Verisyse), werden aus PMMA hergestellt.⁴⁹

Aphakie:* das angeborene Fehlen oder der sekundäre Verlust der Augenlinse

- **Silikon**

Die Polymere aus Silikon und Sauerstoff werden seit 1984 als IOL-Material eingesetzt. Die Linsen aus diesem Material verfügen über einen wichtigen Vorteil: die Silikon-IOLs sind faltbar und können durch eine kleinere Inzision implantiert werden. Das Silikon ist hydrophob. Sein refraktive Index liegt normalerweise zwischen 1,41 und 1,46. Der optische Durchmesser dieser Linsen beträgt 5,5–6,5 mm. Die Silikonlinsen stehen im Verdacht, die bakterielle Adhäsion zu begünstigen. Nach der Implantation trübt sich der anteriore Kapselrand häufig, während die hintere Kapsel viele Jahre lang klar bleiben kann. Mit der Entwicklung der Acryllinsen seit 2005 ging der Einsatz der Silikonlinsen zurück.

49

- **Acrylate**

Acrylat wird heutzutage am häufigsten als Linsenmaterial benutzt. Durch ihre Flexibilität und gute Verträglichkeit werden diese Linsen im Allgemeinen bevorzugt. Man unterscheidet zwischen hydrophobem und hydrophilem Acrylat. Sie sind in der Regel 1- oder 3-teilig. Die Optik hat einen Durchmesser zwischen 5,5 und 7,0 mm, während die Linse einen Gesamtdiameter zwischen 12 und 13 mm hat. Die Farbe ist typischerweise transparent oder gelb.

Die hydrophilen Acryllinsen sind weich und haben aufgrund ihrer hydrophilen Oberfläche eine gute Biokompatibilität. Die meisten IOLs sind einteilig und konzipiert für die Kapselsackimplantation.

In einer Umfrage der DGII 2005 gaben Ophthalmochirurgen an, dass sie 64 % hydrophobes Acrylat und 30 % hydrophiles Acrylat bevorzugen. Die Acryllinsen haben einen refraktiven Index von 1,44 bis 1,55 und sind damit in der Regel dünner als PMMA-Linsen. ^{51, 52}

1.8.3 Optik der IOL

Die geometrische Konfiguration der IOL wird weiterentwickelt. Die Geschichte dieser Entwicklung zeigt, dass die Form der IOL-Kante eine Rolle bei der Nachstarentwicklung spielt. Die scharfe hintere Kante der IOL verhindert die Entstehung eines Nachstars, indem sie eine Barriere für das Linsenepithel bildet.

Die meisten IOLs haben eine symmetrische bikonvexe Optik. Das bedeutet, dass die Krümmung der vorderen und hinteren Fläche der IOL identisch sind. Die Mehrheit der IOLs haben eine effektive optische Zone von 6 mm.

Die moderne Kataraktchirurgie umfasst die Implantation von Intraokularlinsen zur Verbesserung der visuellen Qualität durch Korrekturen, die über den Ausgleich des Defokusfehlers (Sphäre) hinausgehen. In den Fällen, wenn auch ein Astigmatismus $> 0,75$ D vorhanden ist, besteht heutzutage die Möglichkeit, diesen durch Implantation einer torischen IOL zu korrigieren.

Diese Linsen brechen das Licht in einem Meridian stärker als im anderen. Dadurch können die torischen Linsen einen regelmäßigen cornealen Astigmatismus ausgleichen. Sie finden sowohl bei der Kataraktoperation als auch beim refraktiven Linsenaustausch Anwendung. Die Voraussetzungen einer optimalen Korrektur des Astigmatismus sind eine optimale Lage und eine exakte Orientierung der IOL-Achse. Nur so ermöglicht die torische IOL die Korrektur des kornealen Astigmatismus. Ein irregulärer Astigmatismus, wie z. B. beim Keratokonus, wird nur verringert, aber nicht vollständig korrigiert. Auf dem Markt existieren torische Linsen mit verschiedenen Astigmatismusstärken. Manche Hersteller bieten bei höheren Astigmatismen auch eine individuelle Herstellung der IOL an.^{50,51}

- **Multifokale Intraokularlinsen**

Die multifokalen IOLs (1,2 % aller Implantationen 2007, Tendenz steigend) bieten dem Patienten zwei oder mehr Brennpunkte und ermöglichen so ein gutes Sehen in mehr als einer Entfernung (in die Ferne und im Nahbereich) ohne zusätzliche optische Korrektur. Der Vorteil dieser IOLs ist die relative Brillenfreiheit nach der Linsenoperation. Aufgrund verschiedener optischer Prinzipien werden die multifokalen IOLs in refraktive (lichtbrechende) Linsen, diffraktive (lichtbeugende) Linsen und Linsen mit Kombination aus diffraktiver und refraktiver Optik unterteilt. Insgesamt verursachen die mIOLs, im Vergleich zu den monofokalen IOLs, gehäuft optische Phänomene*.⁵²⁻⁵⁴

optische Phänomene:* oder s.g. *Dysphotopsien (engl.)*. Es gibt positive und negative *Dysphotopsien*, die nach einer *Kunstlinsenimplantation* bei allen *IOLs*, jedoch gehäuft nach der *Implantation einer mIOL* auftreten können. Bei der *positiven Dysphotopsie* handelt es sich um unerwünschte *Lichtwahrnehmungen* bei *Beobachtung einer Lichtquelle*. Es sind verschiedene *Phänomene* wie z.B. *Halos, Glare* und *vermehrte Blendempfindlichkeit* zu beobachten. Bei der *negativen Dysphotopsie* handelt es sich um eine *schwarze Linie* oder *Sichel* in der *Peripherie des Gesichtsfeldes* des Patienten

Akkommodative Intraokularlinsen

Die akkommodativen *IOLs* dienen der Wiederherstellung der *Akkommodation* (*Nah- und Ferneinstellung des Auges*) nach der *Kataraktoperation*. Die derzeit vertriebenen und klinisch angewandten Modelle basieren auf dem Prinzip der *anterior-posterioren Linsenverschiebung* und konnten in Studien nur eine *moderate Verbesserung der Nahsehschärfe* erzielen. *Akkommodative IOL* mit anderen Wirkungsmechanismen befinden sich noch in der *Erprobungs- bzw. Entwicklungsphase*.

1.8.4 Auswirkung der Ausrichtung der torischen IOL auf das refraktive Ergebnis

Bei jedem Grad der Fehlausrichtung gehen etwa 3 % der *Zylinderkraft* der Linse verloren. Das bedeutet, dass bei einer *Fehlausrichtung von 30°* ein *Totalverlust* der *astigmatischen Korrektur* der *IOL* zu erwarten ist. Bei einer *Abweichung von mehr als 30°* wird der vorhandene *Astigmatismus* sogar *verstärkt*.⁵⁵

1.8.5 Haptik der IOL

Die ersten Linsen, die benutzt wurden, waren ohne *Haptik*. Die fehlende *Haptik* führte zu einer *mangelhaften Befestigung* der *IOL*. Dieses Problem der ersten *IOL* brachte die Hersteller auf die Idee, dass die *künstliche Linse* einen eigenen *Stützapparat* braucht. Da die *Ophthalmochirurgen* und Hersteller eine hohe

Priorität auf die optimale Lage und den stabilen Sitz der IOL legen, wurde seitdem versucht bessere Haptikformen zu entwickeln. Gleichzeitig wurden auch neue Materialien verwendet. Die heutige IOLs verfügen über Haptiken, die am häufigsten aus PMMA, Polypropylen, Polyamid oder PVDF hergestellt worden sind. Die erste moderne Haptik, die benutzt wurde, war die „J-Haptik“, weil sie dem Buchstaben „J“ ähnelte. Als nächste veränderte Haptik kam die „C-Haptik“. Eine andere populäre Form für Linsen-haptik sind die in den 1980er-Jahren geschaffene „Plattenhaptik“. Diese Linsen haben kleine Flügel seitlich der Optik.⁴⁹



Abbildung 6: C-Haptik versus Plattenhaptik einer einstückigen Acryllinse (Journal of Refractive Surgery. 2013; 29 (4): 252–259)

1.9 Standardlinsen-chirurgie

Die Standardkataraktchirurgie der altersbedingten Katarakt verläuft in den meisten Ländern wie ein Routineeingriff. Am häufigsten werden heutzutage faltbare monofokale sphärische oder asphärische Acryllinsen benutzt. Die modernen Faltlinsen sind teilweise eine Weiterentwicklung der frühen Weichlinsen aus Silikon und Hydrogel. Die neuen faltbare Materialien ermöglichen die Operation durch Inzisionsschnitte, die viel kleiner sind als zuvor. Die moderne Phakoemulsifikation erfolgt durch Schnitte von 2–2,5 mm. Zum anderen werden die chirurgischen Schnitte lamellär durchgeführt, sodass sie sich

nach der Entfernung der Instrumente selbst verschließen. In diesem Fall spricht man von einer nahtlosen Kataraktoperation.

1.10 Spezielle Linsen Chirurgie

Bei unkonventionellen Eingriffen (z. B. Kinderkatarakt, hohe Myopie oder Mikrophthalmus) gibt es neben den oben erwähnten Standardlinsen auch Speziallinsen mit angepasster Größe. Bei Patienten mit partiellen oder kompletten Irisdefekten oder Fehlbildungen existieren heute die sogenannten Aniridielinsen*, die einen Pinhole-Effekt haben und damit zum Teil die fehlende Pupille ersetzen, wodurch die Blendung des Patienten bei grellem Licht reduziert wird.^{56 57}

**Aniridie: das partielle oder komplette Fehlen der Iris*

1.11 Refraktive Intraokularlinsen Chirurgie

Die neueste Gruppe von Intraokularlinsenimplantaten bildet die Gruppe von Linsen, die im Rahmen von refraktiven Eingriffen implantiert werden. Diese werden sowohl bei der Kataraktoperation als auch bei einem RLA (s. Abschnitt 1.7.4) implantiert. Nachdem die natürliche, bereits getrübe Linse des Auges entfernt wurde, wird eine sogenannte Premiumlinse eingesetzt. Diese kann asphärisch, multifokal oder torisch sein. Die Kunstlinsen sollten die Funktion der natürlichen Linse übernehmen und einen refraktiven Ausgleich nach der Entfernung der natürlichen Linse ermöglichen. Die Sekundärimplantation einer künstlichen Linse in ein aphakes Auge stellt auch einen refraktiven Eingriff dar.

1.12 Komplikationen nach Kataraktchirurgie

Die bisher publizierten Studien berichten über Komplikationen während oder nach einer Kataraktoperation in weniger als 1 % der Behandlungsfälle. Trotz dieser geringen Komplikationsrate kann die Komplikation in seltenen Fällen zur Erblindung des Patienten führen, sodass die Indikation zur Kataraktoperation besonders bei Patienten mit reduzierter Compliance abgewogen werden sollte. In anderen Fällen, wenn die Operation als refraktiver Linsenaustausch

durchgeführt wird, sollten die Risiken und Komplikationsmöglichkeiten mit dem Patienten ausführlich und in verständlicher Sprache besprochen werden.

Die schwerwiegendste postoperative Komplikation, die Endophthalmitis, ist bei Beachtung der entsprechenden antiseptischen Maßnahmen heutzutage sehr selten. Eine Endophthalmitisrate von 0,15 % wurde für Deutschland Ende der 1990er-Jahre publiziert.⁵⁸ Im Jahr 2008 wurden insgesamt 1.740 Patienten aufgrund einer Endophthalmitis stationär behandelt. 85 % der Patienten waren über 50 Jahre alt und 56 % waren weiblich.⁵⁹ Ein schwerer Verlauf der Endophthalmitis kann eine Vitrektomie, d. h. eine chirurgische Entfernung des Glaskörpers, erforderlich machen. Eine weitere Studie, welche über die Häufigkeit der postoperativen Endophthalmitis nach Kataraktoperation chronologisch berichtet, gibt eine Inzidenz von 0.041% im Zeitraum von 1999 bis 2009 an.⁶⁰ Eine andere große Studie aus Frankreich, die über 6,2 Millionen Kataraktoperationen, die zwischen 2005 und 2014 durchgeführt wurden, analysiert, stellte fest, dass die Inzidenz der Endophthalmitis insgesamt bei 0,102 % lag.⁶¹

Eine andere mögliche Komplikation nach Durchführung einer Kataraktoperation ist die Entwicklung eines zystoiden Makulaödems (CME). Dieser postoperative Zustand ähnelt in seiner Pathophysiologie einer uveitischen Reaktion, da dieselben Mediatoren (Interleukinen, Prostaglandine und Zytokine) für die Entstehung des CME verantwortlich sind. Im Bereich der Makula sammelt sich Flüssigkeit infolge eines Austritts aus den perifovealen Kapillaren. Bei Patienten, die eine Vorgeschichte für Uveitis haben, kommt es gehäuft zum CME. Die Behandlung mit lokalen Kortikosteroiden bei Patienten mit bekannter Uveitis hemmt die Produktion von Zytokinen und reduziert das Risiko für ein Makulaödem. In der Regel sind auch lokale Steroide ein Teil der postoperativen lokalen Therapie nach einer Linsenoperation.^{62,63}

Der sogenannte Nachstar stellt eine der häufigsten postoperativen Komplikationen bei einer Kataraktoperation dar. Laut Studien entsteht ein Nachstar (s. g. *Cataracta secundaria*) in ca. 30–50 % der Fälle. Die modernen Operationstechniken und moderne, faltbare Linsen haben in den letzten Jahren zu einer deutlich geringeren Nachstarrate geführt. Durch eine Behandlung

mithilfe eines YAG-Lasers kann der Nachstar meist problemlos behandelt werden.^{64,65}

Beim Einsatz einer torischen IOL existieren spezifische Komplikationen: Eine davon ist die fehlerhafte Ausrichtung der torischen IOL. Die falsche Achsenlage einer torischen IOL kann verschiedene Ursachen haben: z. B. eine fehlerhafte Positionierung der Linse intraoperativ, eine Fehlschätzung des Hornhautastigmatismus oder eine postoperative Rotation der torischen IOL mit Verlust ihrer ausgleichenden astigmatischen Wirkung. Bei einem großen Unterschied zwischen gewünschter und tatsächlicher IOL-Position oder postoperativer Rotation kann eine operative Nachrotation zur Korrektur der Achsenlage erforderlich werden. Bei signifikanter Abweichung von dem gewünschten Ergebnis trotz einer Rotation der torischen IOL, kann optional ein refraktiver Hornhauteingriff durchgeführt werden.⁶⁶⁻⁶⁹

2. Ziel der Arbeit

Das Ziel dieser Arbeit ist eine postoperative Analyse des visuellen und refraktiven Ergebnis nach der Re-Operation zur Neuausrichtung der torischen Linse bei unpassender Achsenlage. Die Analyse dieser Ergebnisse gibt Informationen darüber, wie sich der bestkorrigierte und unkorrigierte Visus nach einer Neuausrichtung verändert hat. Ein anderer Aspekt der Studie ist der refraktive Vergleich zwischen dem präoperativen und postoperativen sphärischen Equivalent und des Restastigmatismus in der objektiven Refraktion der Patienten. Ein weiterer Aspekt der Arbeit ist die Anwendung des Onlinerechners *astigmatismfix.com* bei der Planung der Neuausrichtung der Intraokularlinse und die Evaluation der postoperativen Ergebnisse. Der Rückrechner *astigmatismfix.com* basiert auf einer Vektoranalyse und schlägt eine neue optimale Ausrichtungsachse der tIOL vor. Des Weiteren gibt er eine Prognose über die postrotatorische Refraktion des Patienten an.

3. Material und Methoden

Es handelt sich um eine retrospektive, nicht randomisierte, monozentrische Studie. Wir schlossen alle Augen die im Zeitraum von August 2013 bis Dezember 2019 an der Universitätsaugenklinik Frankfurt am Main eine Linsenoperation mit Implantation einer torischen Intraokularlinse (IOL) sowie im postoperativen Verlauf eine Reoperation zur Optimierung der Lage der torischen Linse erhalten hatten in diese Studie ein. Es waren insgesamt 39 Augen von 39 Patienten. Alle Patienten wurden vom selben erfahrenen Ophthalmochirurgen Professor Thomas Kohnen primär und sekundär operiert. Die Studiendaten wurden aus den Patientenakten in Papierform und den elektronischen Patientenakten entnommen, pseudonymisiert und statistisch analysiert. Die Studie wurde von der lokalen Ethikkommission befürwortet und entspricht den ethischen Grundsätzen für die medizinische Forschung am Menschen, die in der Deklaration von Helsinki erfasst wurden.

Wir unterteilten die Patienten anhand der intraoperativen Ausrichtung in zwei Gruppen. In Gruppe 1 erfolgte die Rotation auf die primär berechnete Achse. In Gruppe 2 hingegen erfolgte eine neue Kalkulation einer neuen Achse mithilfe des Onlinerechners *astigmatismfix.com*. Der Vergleich ist relevant, um zu beantworten, wie zuverlässig die Kalkulation über *astigmatismfix.com* ist und ob seine Verwendung im klinischen Alltag tauglich ist. Um einen Vergleich der Ergebnisse nach Implantation einer IOL mit einer torischen Komponente < 2 D und $\geq 2,0$ D zu ermöglichen, wurde eine Subgruppenanalyse durchgeführt. Die Subgruppe der Patienten, die Linsenimplantate mit einer torischen Stärke < 2 D erhielten, definierten wir als Subgruppe 1. Die Gesamtheit der Patienten, die Linsenimplantate mit einer torischen Stärke ≥ 2 D bekamen, definierten wir als Subgruppe 2.

Für alle Daten wurde einen Mittelwert und sein 95% Konfidenzintervall berechnet. Die statistische Signifikanz ist mit dem t-Test bestimmt worden. Das Signifikanzniveau wurde bei 5% angelegt.

Für die Berechnung des primären postoperativen und postrotatorischen Astigmatismus wurde eine Vektoranalyse durchgeführt.

3.1 Einschlusskriterien

Das Einschlusskriterium für die Studie war die unkomplizierte femtosekundenlaserassistierte Kataraktoperation oder der refraktive Linsenaustausch mit Austausch der natürlichen Linse gegen eine torische IOL. Darauf folgend erfolgte eine Folgeoperation zur Rotation der torischen IOL bei Abweichung von der primär kalkulierten Achse. Alle Patienten waren über 18 Jahre alt und das Geschlecht spielte keine Rolle beim Studieneinschluss.

3.2 Ausschlusskriterien

Aus der Studie wurden Patienten ausgeschlossen, die intraoperativ eine suboptimale Achsenlage der torischen Komponente der Linse zeigten. Patienten, bei denen es während der Operation zu Komplikationen kam (z. B. Linsluxation oder Verletzung von Hornhaut, Iris oder Linsenaufhängeapparat) oder Komplikationen während des postoperativen Follow-ups auftraten (z. B. Endophthalmitis) wurden ebenfalls nicht in die Studie eingeschlossen. Auch andere operative Eingriffe (z. B. Vitrektomie) zwischen der Kataraktoperation und der Re-Rotation der torischen IOL galten als Ausschlusskriterium. Aus der Studie wurden alle Patienten ausgeschlossen, die zu den vereinbarten Kontrolluntersuchungen (eine Woche, drei Monate, ein Jahr) postoperativ nicht erschienen und dadurch Datenlücken entstanden.

3.3 Präoperative Untersuchungsmethoden

Vor jeder Operation erhielt jeder Patient eine umfassende mündliche und schriftliche Aufklärung über die anstehende Operation. Die ophthalmologische Voruntersuchung ist standardisiert und beinhaltet neben der objektiven Refraktion und Erhebung des unkorrigierten und bestkorrigierten Visus eine ophthalmologische Untersuchung des Vorder- und Hinteraugenabschnittes an der Spaltlampe (Biomikroskopie), eine Augeninnendruckmessung mittels Applanationstonometrie (nach Goldmann) und eine Scheimpflug-Hornhauttomographie (Pentacam HR® Oculus, Wetzlar, Deutschland). Die

Biometrie zur Bestimmung der Linsenstärke erfolgte mittels Barrett-Formel (IOL Master 500/700, Carl Zeiss Meditec, Jena, Germany).

3.4 Durchführung der Linsenoperation

Bei der femtosekundenlasergestützten Kataraktoperation und die Re-Operation werden die erforderlichen Schnitte mit dem Femtosekundenlaser durchgeführt. Alle unsere Patienten wurden primär mit Hilfe der Femtosekundenlasermaschine (LenSx® von Alcon, Fort Worth, TX, USA) operiert. Das Operationsmikroskop verfügt über eine Software für digitale Markierung (VERION™ Digital Marker). Die Operation verlief in Tropfenanästhesie unter ambulanten Bedingungen.

3.4.1 Docking, Stabilisierung und Kapsulotomie

Bei der Femtosekundenlaserchirurgie wird das Auge stabilisiert, indem die Laserplattform an die Augenoberfläche angedockt wird. Zunächst werden die lamellären Hornhautexzisionen mithilfe eines integrierten OCT (optische Kohärenztomographie) festgelegt. Es wurde nachgewiesen, dass die lamellären Inzisionen stabiler sind und mit weniger Wundleckagen einhergehen. Eine suboptimale Form der Inzision kann zu einem erhöhten chirurgisch induzierten Astigmatismus, Wundleckage mit postoperativer Hypotonie und postoperativer Endophthalmitis führen. Zur Stabilisierung des Auges und als Schutz der Endothelzellen wird die Vorderkammer mit Hilfe einer viskoelastischen Substanz vertieft.^{70,71} Als nächster Schritt erfolgt die Eröffnung der vorderen Linsenkapsel mit dem Femtosekundenlaser (Kapsulotomie). Dadurch können die genaue Größe und die Zentrierung bestimmt und gesteuert werden.

3.4.2 Linsenfragmentierung

Der Femtosekundenlaser kann eine Kernfragmentierung in Form verschiedener Schnittmuster durchführen, um die Linse aufzuspalten, wodurch im Vergleich zu der konventionellen Phakoemulsifikation die benötigte Phakoenergie und die effektive Phakoemulsifikationszeit (EPT) verringert werden.^{72,73} Es wurde bewiesen, dass das Risiko für Kapselkomplikationen und einen kornealen

Endothelzellverlust geringer ist.^{74,75} Ein Vergleich von EPT zwischen Patientengruppen mit Katarakt zeigte eine signifikant kürzere EPT in der Gruppe, die eine femtosekundenlasergestützte Linsenoperation erhielt, im Vergleich zu der Phakoemulsifikationsgruppe ohne Lasereinsatz.^{76,77}

3.4.3 Implantation der torischen Linse

Die Implantation der Linse erfolgt nach Beendigung des oben genannten Prozesses und findet nach wie vor manuell durch den Operateur statt. Die Markierung der Achsenlage der torischen IOL erfolgte bei allen unseren Patienten sowohl manuell vor der Operation in sitzender Position als auch mithilfe des Verion-digital-Markers des LenSx-Femtosekundenlasers. Die Linse wird vom Ophthalmochirurgen durch die Hauptinzision in die Vorderkammer und in den Kapselsack eingeführt. Dort wird sie auf die vorkalkulierte Achse mithilfe des digitalen Markers rotiert. Nachdem die korrekte Ausrichtung erfolgte, wurde das Viskoelastikum aus dem Auge entfernt. Danach wurde intrakammerale Antibiose mit Cefuroxim (Frisenius) in Konzentration 1 mg/ml appliziert und die kornealen Schnitte wurden hydriert. Postoperativ bekamen die Patienten eine lokale Therapie mit Antiphlogistika (Acular® Augentropfen (Allergan) 3x tgl. oder Nevanac® Augentropfen 3 mg/ml (Novartis Pharma GmbH) 1x tgl.) für sechs Wochen und Steroidtherapie mit DEXA EDO Augentropfen (Dr. Gerhard Mann) 3x tgl. für zwei Wochen.

3.5 Die postoperative Kontrolle

Die postoperativen Kontrollen fanden nach der Linsenoperation (Kataraktchirurgie oder refraktiver Linsenaustausch) wie üblich in unserer Klinik, nach einem Tag, einer Woche und drei Monaten sowie jährlich statt. Bei jedem Kontrolltermin wurde der Organbefund durch einen Augenarzt erhoben. Am ersten postoperativen Tag wurde der UCVA und Augeninnendruck kontrolliert, sowie postoperative Komplikationen, insbesondere eine Infektion, ausgeschlossen. Eine Woche postoperativ erfolgte an den Kontrollterminen eine subjektive Refraktion mit Bestimmung des unkorrigierten und korrigierten Visus für die Ferne, Intermediärbereich und Nähe durch einen Optiker. Der

Restzylinder (Astigmatismus) wurde objektiv zusätzlich mittels Autorefraktometer geprüft. Die Position der torischen IOL wurde eine Woche postoperativ an der Spaltlampe in Mydriasis mithilfe der Retroilluminationsmethode* kontrolliert und in der Patientenakte dokumentiert.

**Retroilluminationsmethode: Bei dieser Untersuchungsmethode wird die Pupille erweitert, der Lichtstrahl der Spaltlampe fällt senkrecht auf die Hornhaut und die Linse. Die Markierung der torischen Linse wird dadurch sichtbar und wird auf einer Skala von 0 bis 180° gemessen.*

3.6 IOL-Rotations-Operation

Die Indikation für die IOL-Rotation wurde durch den Operateur (T.K.) bei einer Abweichung über 5 Grad von der primären Zielachse oder bei Patienten mit einer deutlichen subjektiven Unzufriedenheit gestellt. Die Markierung der neuen Achse der torischen Linse wurde wie bei der Linsenoperation manuell präoperativ durchgeführt und mit dem Verion-digital-Marker intraoperativ unterstützt. Es wurde weder eine zusätzliche limbal-relaxierende Hornhautinzision noch eine astigmatische Keratotomie durchgeführt. Außerdem wurde kein Kapselspannring implantiert und alle Operationen wurden in Lokalanästhesie durchgeführt.

3.7 Gruppen- und Subgruppenanalyse

Die Aufteilung in zwei Gruppen erfolgte retrospektiv entsprechend der Auswahl der Rotationsmethode. Die Patienten, die eine Rotation der fehlausgerichteten torischen Linse auf die primär berechnete Achse bekamen, bezeichneten wir als Gruppe 1 (20 Patienten). Die optimale Achse wurde bei den restlichen 19 Patienten (Gruppe 2) mit Hilfe des Online-Rechners unter *astigmatismfix.com* (Ocular Surgical Data LLC, Sioux Falls, SD, USA) neu berechnet.

Um das Ergebnis für IOLs mit einer hohen Zylinderstärke von < 2 D und $\geq 2,0$ D zu analysieren, wurde zudem eine Subgruppenanalyse durchgeführt.

4. Ergebnisse

Unsere Studie umfasst 39 Augen (20 rechte Augen) von 39 Patienten, die im Zeitraum von August 2013 bis Dezember 2019 eine Repositions-Operation aufgrund einer visusrelevanten Fehlrotation im Anschluss an eine femtosekundenlaserassistierte Linsenoperation mittels einer torischen IOL erhielten. Die Häufigkeit einer Re-Rotation beträgt 3 % aller Patienten (Gesamtzahl: 1209), die im selben Zeitraum in der Augenklinik der Uniklinik in Frankfurt am Main eine Kataraktoperation mit Implantation einer torischen Linse erhielten. Tabelle 1 zeigt die Eigenschaften der Studienstichprobe.

Variable	Wert
Geschlecht	
männlich	20 (51 %)
weiblich	19 (49 %)
Auge	
rechtes	20 (51 %)
linkes	19 (49 %)
Alter (Jahren) \pm SD	62.03 \pm 12.52
Operation	
Katarakt	29 (74 %)
Refraktiver Linsenaustausch	10 (26 %)
IOL- Haptik	
C-Haptik	27 (69 %)
Plattenhaptik	12 (31 %)
IOL- Model	
AcrySof SN (Alcon, USA)	5 (13 %)
AcrySof IQ PanOptix (TFN, USA)	8 (21 %)
Rayner T-flex toric (Rayner, UK)	6 (15 %)
TECNIS AMO Symphony (J&J Vision Care, USA)	9 (23 %)
AT LISA tri MP (Carl Zeiss Meditec, Germany)	8 (21 %)
AT LARA MP (Carl Zeiss Meditec, Germany)	3 (8 %)
IOL-Stärke (SE ^a , D) \pm SD	18.46 \pm 7.74
Achsenlänge (mm)	24.78 \pm 2.73
Vorderkammertiefe (mm)	3.21 \pm 0.36
White-to-white (mm)	12.03 \pm 0.46
Linsendicke (mm)	
*gemessen mit IOL-Master 700 (21 Augen)	4.46 \pm 0.47
Zeitspanne bis zur Rotation (Tage)	86.54 \pm 157.99

Tabelle 1: Eigenschaften der Studienstichprobe

Die implantierten Intraokularlinsen hatten eine C-Haptik 27 (69 %) bzw. eine Plattenhaptik 12 (31 %). Bei den implantierten IOLs handelte es sich um sechs verschiedene Linsenmodelle, vier davon mit C-Haptik und zwei davon mit einer Plattenhaptik.

Zwei von den oben genannten Intraokularlinsen verfügen über eine monofokale Optik, während die restlichen Modelle über eine mehrfokale (trifokale, quadrifokale) oder tiefenschärfe Optik verfügen (Tabelle 2).

IOL Model	Optik	Haptik
AcrySof SN	monofokal	C-Haptik
AcrySof IQ PanOptix	multifokal	C-Haptik
Rayner T-flex torisch	monofokal	C-Haptik
TECNIS AMO Symphony	multifokal	C-Haptik
AT LISA tri MP	multifokal	Plattenhaptik
AT LARA MP	EDoF-IOL	Plattenhaptik

Tabelle 2: Linsenmodelle in der Studie

4.1 Visuelle Ergebnisse nach der Linsenoperation (BCVA und UDVA)

Das visuelle Ergebnis wurde bestkorrigiert (BCVA) und unkorrigiert (UDVA) evaluiert. Nach Implantation der torischen IOL verbesserte sich der bestkorrigierte Visus (BCVA) von $0,28 \pm 0,22$ logMAR (20/40) auf $0,15 \pm 0,14$ logMAR (20/32) (vgl. Abb. 7). Der unkorrigierte Fernvisus (UDVA), gemessen im Abstand von fünf Metern, betrug postoperativ $0,39 \pm 0,29$ logMAR (20/50).

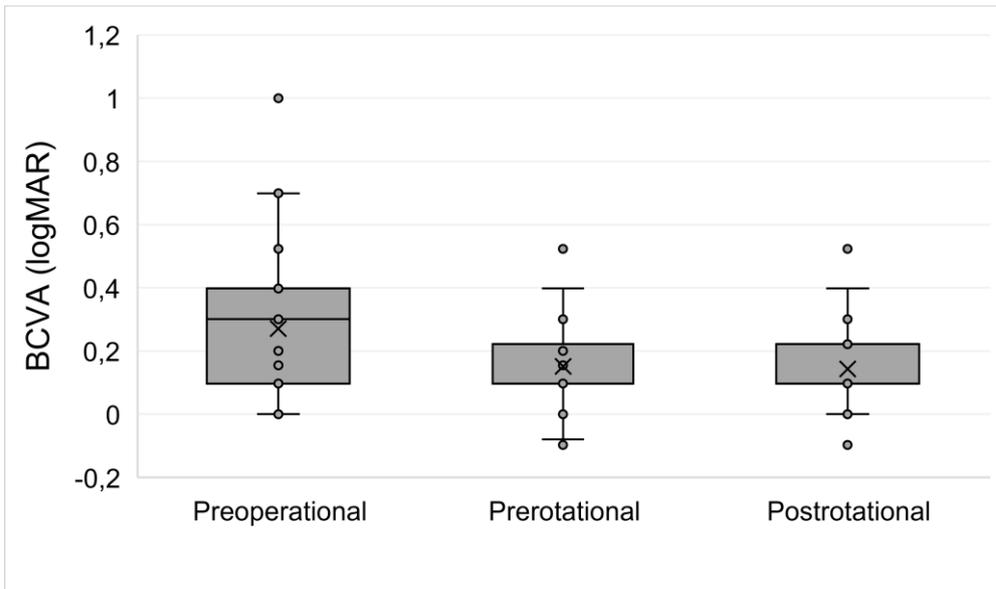


Abbildung 7: Vergleich im BCVA – präoperativ, postoperativ und nach der Rotation der torischen IOL

4.2 Astigmatismus nach der Linsenoperation

Der mittlere Wert des Restzylinders nach der Linsenoperation betrug $-1,87 \pm 2,28$ D. Die Vektoranalyse zeigte nach der Linsenoperation eine Reduktion von $0,61 \pm 2,17$ D auf $0,24 \pm 2,08$ D. Das Ergebnis dieser Analyse ist in Abbildung 8 dargestellt.

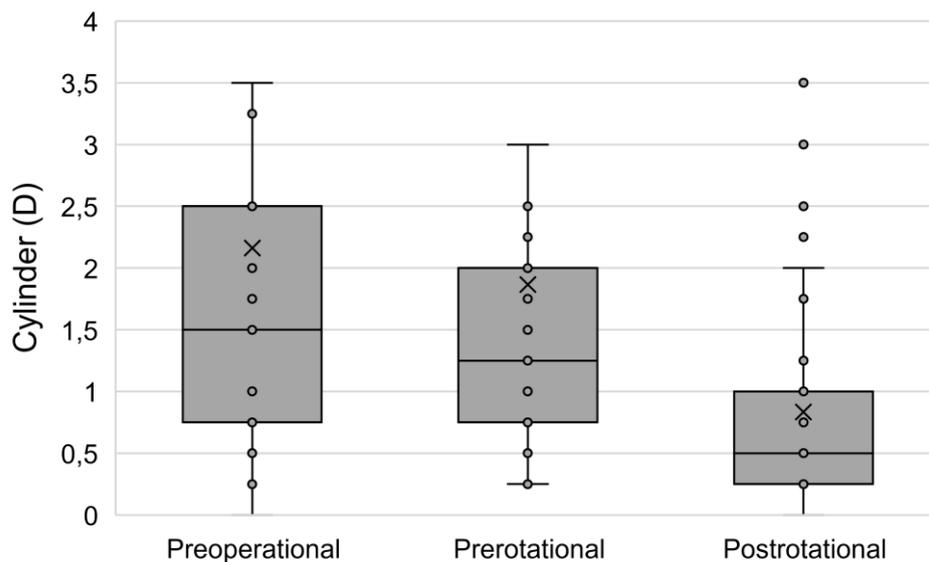


Abbildung 8: Zylinderstärke präoperativ, vor Rotation und nach Rotation

4.3 Rotation der Intraokularlinse

Eine Rotation der Linse bedeutet die Drehung der Linse im Kapselsack und damit einhergehend die Abweichung von der gewünschten präoperativ gemessenen Achse. Bei der postoperativen Untersuchung am siebten postoperativen Tag zeigten die gemessenen Achsen eine Fehlausrichtung der IOL um $25,69^\circ \pm 26,06^\circ$. Eine ungewünschte postoperative Rotation konnte jedoch auch zu einem späteren Zeitpunkt auftreten.

4.3.1 Richtung der Rotation

Wir untersuchten die Richtung der Rotation der IOL, um festzustellen, ob eine Tendenz für eine Rotationsrichtung zu sehen ist. Auf der Basis des kleinsten Winkels wurden 17 (44 %) IOL im Uhrzeigersinn ($30,12^\circ \pm 28,95^\circ$) rotiert, während 22 Augen (56 %) gegen den Uhrzeigersinn ($22,27^\circ \pm 23,72^\circ$) rotierten ($p = 0,138$, Mann-Whitney-U). Getrennt nach Haptik lagen 12 (44 %) IOLs mit einer im Uhrzeigersinn gedrehten C-Haptik und 15 gegen den Uhrzeigersinn (56 %) vor sowie 5 (42 %) IOLs mit einer im Uhrzeigersinn gedrehten Plattenhaptik und 7 (58 %) gegen den Uhrzeigersinn. Der Grad der Drehung durch die Haptik ist in Abbildung 9 dargestellt.

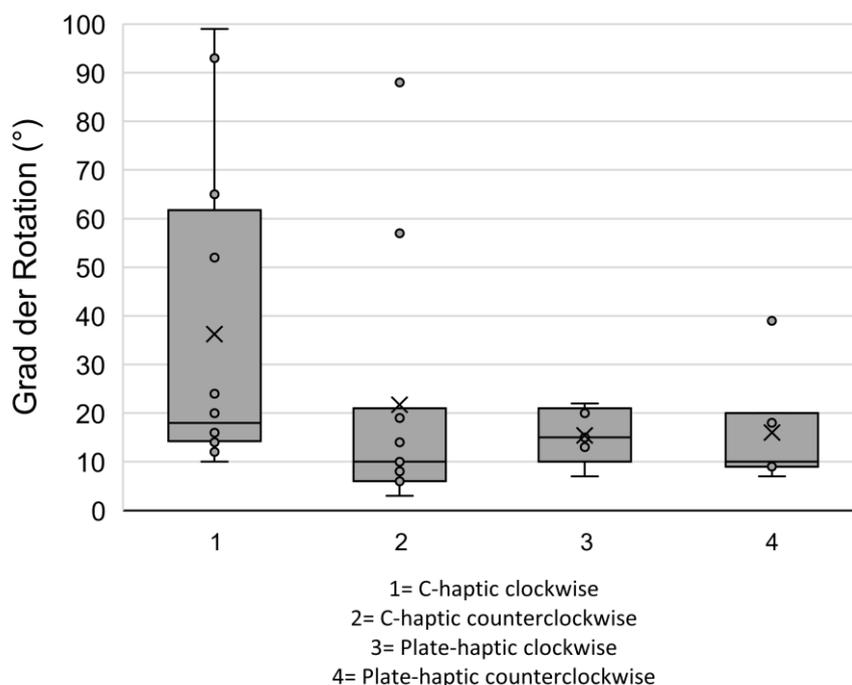


Abbildung 9: Der Grad der Drehung und die Haptik

Im Spearman-Test wurde keine Korrelation zwischen dem Rotationsgrad und der axialen Länge ($24,78 \pm 2,73$ mm; $p = 0,575$, Spearman), der Vorderkammertiefe ($3,21 \pm 0,36$ mm; $p = 0,521$, Spearman), dem Weiß-zu-Weiß-Abstand ($12,03 \pm 0,46$ mm; $p = 0,671$, Spearman) und der natürlichen Linsendicke ($4,46 \pm 0,47$ mm (21/39 Augen, nach IOL-Master; $p = 0,320$) festgestellt.

4.3.2 Visuelle Ergebnisse nach der Rotation

Die Re-Operation zur Korrektur der Achsenlage wurde mithilfe des Verion-Digital-Markers nach durchschnittlich $86,54 \pm 157,99$ Tagen durchgeführt.

Bei allen Augen blieb der BCVA nach Rotation unverändert bei $0,14 \pm 0,14$ logMAR, während sich der UDVA signifikant von $0,39 \pm 0,29$ logMAR auf $0,27 \pm 0,18$ logMAR verbesserte ($p = 0,001$, Wilcoxon) (s. Abb. 10). Das postrotatorische sphärische Äquivalent (SE) lag bei allen Augen innerhalb von 2,25 D.

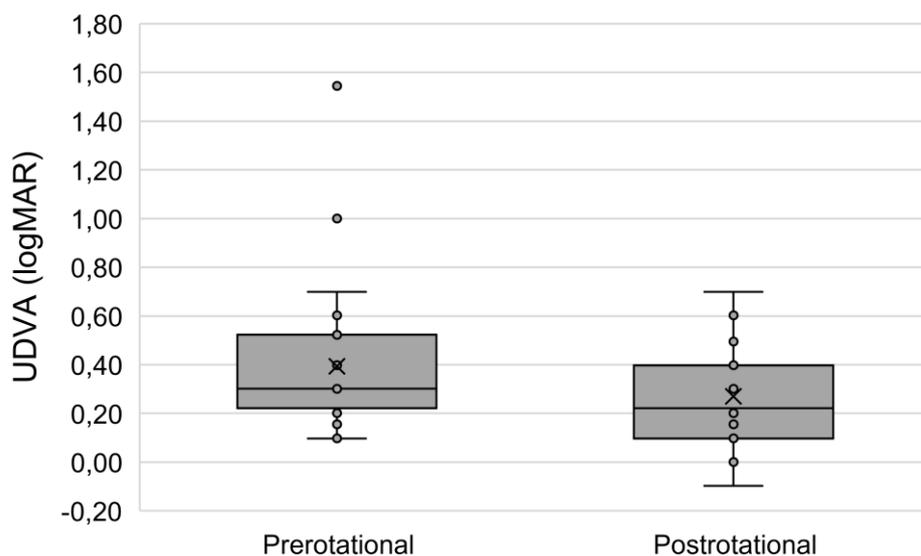


Abbildung 10: UCVA nach der Linsenoperation und postrotatorisch

4.3.3 Astigmatismus nach der Rotation

Das Refraktionsergebnis nach der Rotationsoperation zeigte, dass der Zylinder sich nach der Rotation von $1,87 \pm 2,28$ D auf $0,83 \pm 0,81$ D ($p < 0,001$, Wilcoxon) und die Sphäre von $0,86 \pm 1,56$ D auf $0,28 \pm 0,87$ D ($p = 0,009$; Wilcoxon) verringerten. Die Vektoranalyse zeigte eine Abnahme von $0,24 \pm 2,08$ D auf $0,22 \pm 0,79$ D. Die Fehlansrichtung wurde signifikant von $25,69^\circ \pm 26,06^\circ$ auf $7,32^\circ \pm 12,57^\circ$ reduziert ($p < 0,001$; Wilcoxon-Test). Der präoperative Typ des Astigmatismus (mit/gegen die Regel/oblique) hatte weder Auswirkungen auf die UDVA noch auf den Zylinder ($p = 0,806$; $p = 0,511$, ANOVA). Es konnte keine Beziehung zwischen dem Zeitpunkt der Operation und dem visuellen oder refraktiven Ergebnis (UDVA; BCVA; Zylinder) gefunden werden ($p = 0,586$; $p = 0,532$; $p = 0,555$, Spearman).

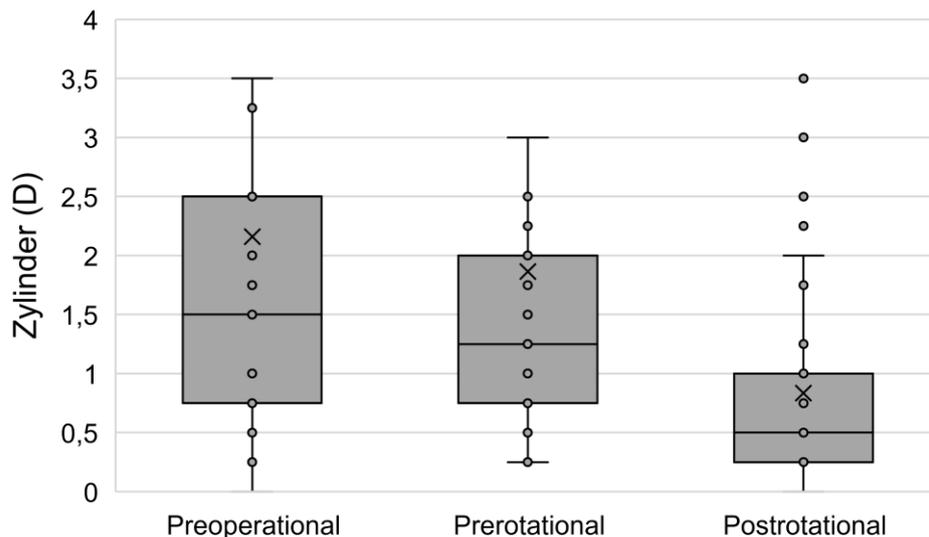


Abbildung 11: Änderung des Zylinders präoperativ, vor und nach der Rotation

4.4 Gruppenanalyse

In 20 Fällen (51 %) wurde die torische IOL auf die präoperativ bestimmte Achse erneut ausgerichtet (Gruppe 1). In 19 (49 %) Fällen wurde vor der Neuausrichtungsoperation eine Rückberechnung mit *astigmatismfix.com* durchgeführt (Gruppe 2).

4.4.1 Visuelle Ergebnisse und residualer Astigmatismus

In der Gruppe 1 wurde die Fehlausrichtung mit einer Rotation auf die primär berechnete Achse um $31,25^\circ \pm 30,11^\circ$ korrigiert. In der Gruppe 2 betrug die Differenz der aktuellen Achse zur berechneten Achse $33,58^\circ \pm 37,29^\circ$. Die Rückberechnung wurde für Gruppe 1 erneut durchgeführt und zeigte bei der zweiten Operation eine Differenz von $18,95^\circ \pm 29,84^\circ$ von der tatsächlich angestrebten Achse. Tabelle 3 zeigt die verschiedenen postrotatorischen Ergebnisse hinsichtlich BCVA, UDVA und Vektoranalyse.

	Prä-operativ	Vor der Rotation	Nach der Rotation	Gruppe 1^a	Gruppe 2^b
Fehlausrichtung (°) ± SD	-	25,69±26,06	7,32±12,57	8,00±16,91	6,53±3,89
Sphäre (D) ± SD	-1,45±5,55	0,86±1,56	0,28±0,87	0,41±1,03	0,05±0,54
Zylinder (D) ± SD	-2,16±2,34	-1,87±2,28	-0,83±0,81	-0,90±0,90	-0,76±0,72
Vectoranalyse (D) ± SD	-	from 0,61±2,17 to 0,24±2,08	from 0,24±2,08 to 0,22±0,79	from 0,44±0,79 to 0,19±0,53	from 0,19±1,18 to 0,05±0,50
UDVA ^c (logMAR) ± SD	-	0,39±0,29	0,27±0,18	0,24±0,16	0,32±0,20
BCVA ^d (logMAR) ± SD	0,28±0,22	0,15±0,14	0,14±0,14	0,11±0,12	0,18±0,15

^aGruppe 1: postrotativ konventionelle Gruppe ohne Rückberechnung

^bGruppe 2: postrotativ Gruppe mit Rückberechnung

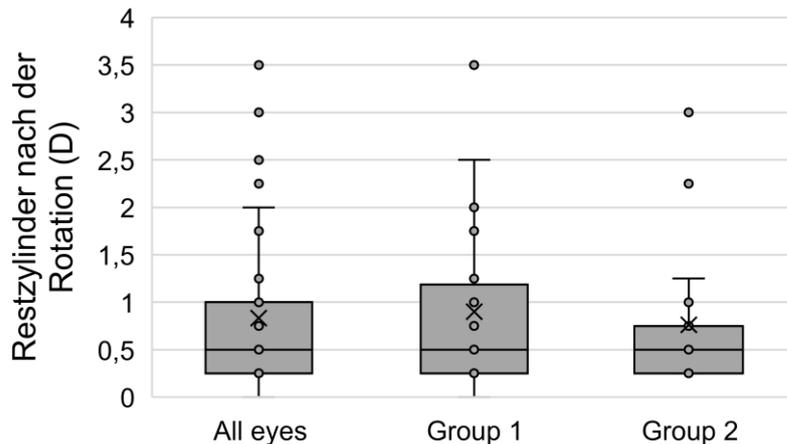
^cUDVA= engl.* uncorrected distance visual acuity = unkorrigierter Fernvisus

^dBCVA= engl. * best corrected visual acuity = bestkorrigierte Sehschärfe

Tabelle 3. Refraktives und visuelles Ergebnis nach Implantation und Neuausrichtung

In Gruppe 1 betrug der postrotatorische BCVA $0,11 \pm 0,12$ logMAR (20/25), der UDVA $0,24 \pm 0,16$ logMAR (20/32) und der Restzylinder $0,90 \pm 0,90$ D. Die Vektoranalyse zeigte eine Abnahme von $0,44 \pm 0,79$ auf $0,19 \pm 0,53$ D. Nach Repositionierung der Linse auf eine neu berechnete Achse (Gruppe 2) betrug der BCVA $0,18 \pm 0,15$ logMAR (20/32) und die UDVA betrug $0,32 \pm 0,20$ logMAR

(20/40) mit einem Restzylinder von $0,76 \pm 0,72$ D (s. Abb. 12). Die Vektoranalyse zeigte eine Abnahme von $0,19 \pm 1,18$ D auf $0,05 \pm 0,50$ D. Es gab keinen signifikanten Unterschied im visuellen und refraktiven Ergebnis (UDVA; BCVA; Zylinder) zwischen den beiden Gruppen ($p = 0,778$; $p = 0,654$, $p = 0,437$, ANOVA).



Gruppe 1: alle Augen ohne Rückberechnung

Gruppe 2: alle Augen mit Rückberechnung

Abbildung 12: Postrotatorischer Restzylinder (D) aufgeteilt in Gruppen hinsichtlich der Rückberechnung

4.4.2 Subgruppenanalyse

Die Fehlausrichtung vor der Repositionierungsoperation betrug $27,28^\circ \pm 26,24^\circ$ bei IOL mit Zylinderstärke < 2 D und $24,95^\circ \pm 27,01^\circ$ bei IOL mit ≥ 2 D ($p = 0,317$, Mann-Whitney-U). Die präoperative Sphäre in der Gruppe der Patienten mit niedrigerer Zylinderstärke der implantierten IOL betrug $0,40$ D $\pm 0,77$. Sie konnte nach der Rotation auf $0,14$ D $\pm 0,46$ reduziert werden. In der Gruppe der Patienten mit einer Zylinderstärke ≥ 2 D der implantierten IOL wurde die präoperative Sphäre nach der Rotation von $1,23$ D $\pm 1,99$ auf $0,38$ D $\pm 1,07$ reduziert. Bei dem Zylinder änderte sich der prärotative Zylinder in der Gruppe der IOLs mit < 2 D von $-1,08$ D $\pm 0,68$ auf $-0,50$ D $\pm 0,30$. In der Gruppe mit Zylinderstärke der IOL ≥ 2 D änderte sich der Wert des Zylinders von -

2,34 D \pm 2,84 auf -1,03 D \pm 0,91. Alle Ergebnisse bezüglich der Subgruppenanalyse sind in Tabelle 3 zusammengefasst.

	IOL^e Zylinder- stärke < 2 D (18 Augen)	Gruppe A^a (8 Augen)	Gruppe B^b (10 Augen)	IOL Zylinder- stärke \geq 2 D (20 Augen)	Gruppe C^c (12 Augen)	Gruppe D^d (8 Augen)
Prärotative Fehlausricht- ung (°) \pm SD	27,28 \pm 26,24	27,00 \pm 28,90	27,50 \pm 25,51	24,95 \pm 27,01	34,67 \pm 31,43	10,38 \pm 4,78
Prärotative Sphäre (D) \pm SD	0,40 \pm 0,77	0,00 \pm 0,35	0,73 \pm 0,87	1,23 \pm 1,99	1,46 \pm 2,50	0,88 \pm 0,87
Postrotative Sphäre (D) \pm SD	0,14 \pm 0,46	0,13 \pm 0,46	0,15 \pm 0,47	0,38 \pm 1,07	0,60 \pm 1,27	0,31 \pm 0,60
Prärotativer Zylinder (D) \pm SD	-1,08 \pm 0,68	-0,78 \pm 0,49	-1,33 \pm 0,73	-2,34 \pm 2,84	-2,56 \pm 3,55	-2,00 \pm 1,36
Postrotatori- scher Zylinder (D) \pm SD	-0,50 \pm 0,30	-0,53 \pm 0,39	-0,48 \pm 0,22	-1,03 \pm 0,91	-1,15 \pm 1,06	-0,84 \pm 0,65
Vektoranaly- se (D) \pm SD	von 0,02 \pm 0,59 bis 0,12 \pm 0,27	von 0,06 \pm 0,24 bis 0,08 \pm 0,20	von 0,08 \pm 0,53 bis 0,06 \pm 0,18	von 0,37 \pm 1,81 bis 0,14 \pm 0,63	von 0,18 \pm 0,71 bis 0,05 \pm 0,46	von 0,11 \pm 0,75 bis 0,06 \pm 0,33
Postrotatori- sch UDVA ^f (logMAR) \pm SD	0,21 \pm 0,18	0,16 \pm 0,13	0,25 \pm 0,21	0,32 \pm 0,18	0,29 \pm 0,17	0,36 \pm 0,20

Postrotatori	0,14±	0,61±	0,20±	0,15±	0,14±	0,16±
sch BCVA ^g	0,16	0,05	0,19	0,13	0,14	0,10
(logMAR) ±						
SD						

aGruppe A: IOL torische Stärke < 2 D ohne Rückberechnung

bGruppe B: IOL torische Stärke < 2 D mit Rückberechnung

cGruppe C: IOL torische Stärke ≥ 2 D ohne Rückberechnung

dGruppe D: IOL torische Stärke ≥ 2 D mit Rückberechnung

eIOL= intraokulare Linse

fUDVA= unkorrigierter Fernvisus

gBCVA=bestkorrigierter Fernvisus

Tabelle 3: Refraktive und visuelle Ergebnisse der Subgruppenanalyse

Die Vektoranalyse der Refraktionsfehler bei IOLs mit niedriger Zylinderstärke (< 2 D) zeigte einen Anstieg ohne Rückberechnung (Anstieg um 0,14 ± 0,31 D) und einen Rückgang mit Rückberechnung (Rückgang um 0,06 ± 0,50 D).

In der Gruppe mit IOL mit hohem Zylinder (≥ 2 D) ohne Rückrechnung zeigten vier Fälle einen Restzylinder von ≥ 1,0 D. In drei dieser vier Augen war die postrotative Fehlausrichtung ≤ 5°, jedoch mit einem Restzylinder von -2,0, -3,5 bzw. -1,0 D. Die mit dem Online-Rechner von astigmatismfix.com berechneten Achsen weichen um 9°, 37° und 47° von der beabsichtigten Achse ab.

In der Gruppe mit IOL hoher Zylinderstärke mit Rückrechnung zeigten zwei Fälle einen Restzylinder von -2,25 und -1,25 D; in beiden Augen betrug die postoperative Fehlausrichtung > 5°. Der erste Fall zeigte eine Fehlausrichtung von 8° bei einem IOL-Zylinder von 6 D; der zweite Fall zeigte eine Fehlausrichtung von 10° bei einem IOL-Zylinder von 5,5 D. Tabelle 4 fasst die genannten Fälle zusammen.

		Rest- zylinder (D)	Fehl- ausrichtung (°)	Torische IOL- Stärke ^c (D)	Vorgeschlagener Unterschied in der Ausrichtung durch Rückrechner (°) (Vorhergesagter Restzylinder (D))
Grupp eC ^a	Patient 1	-2.5	19	6.0	100 (0.1)
	Patient 2	-2.0	5	4.5	9 (1.9)
	Patient 3	-3.5	2	6.0	37 (3.66)
	Patient 4	-1.0	2	2.25	47 (0.13)
		Rest- zylinder (D)	Fehl- ausrichtung (°)	Torische IOL-Stärke (D)	Berechneter Restfehler aufgrund des Versatzes (D)
Grupp eD ^b	Patient 1	-2.25	8	6.0	1.58
	Patient 2	-1.25	10	5.5	1.82

^aGruppe C: postrotativ, Subgruppe (IOL torische Stärke ≥ 2 D) ohne Rückberechnung

^bGruppe D: postrotativ, Subgruppe (IOL torische Stärke ≥ 2 D) mit Rückberechnung

^cIOL= Intraokularlinse

Tabelle 4: Die Fälle in der Untergruppe mit hoher Zylinderstärke IOL (≥ 2 D) und mit Restzylinder ≥ 1 D

In einem letzten Schritt der Studie wurde der Vorhersagefehler ausgewertet. In Gruppe 1 ohne Rückberechnung betrug der mittlere absolute Vorhersagefehler der Restsphäre $0,82 \pm 0,91$ D und in Gruppe 2 mit Rückberechnung $0,46 \pm 0,56$ D. Der mittlere absolute Vorhersagefehler des sphärischen Äquivalents betrug $0,74 \pm 0,89$ D für Gruppe 1 und $0,48 \pm 0,53$ D für Gruppe 2. Der Prozentsatz der Augen in einem bestimmten Bereich der Restsphäre und des Zylinders ist in Abbildung 13 dargestellt. Einen Restzylinder von $\pm 0,5$ D wiesen in Gruppe 1 80% der Augen, im Vergleich zu 78% der Augen in Gruppe 2 auf. 90% der Augen in Gruppe 1 und 89% der Augen in Gruppe 2 wiesen einen Vorhersagefehler von $\pm 1,0$ D auf, wohingegen alle Patientenaugen in Gruppe 2 und 95% der Augen in Gruppe 1 einen Vorhersagefehler von $\pm 1,5$ D aufwiesen.

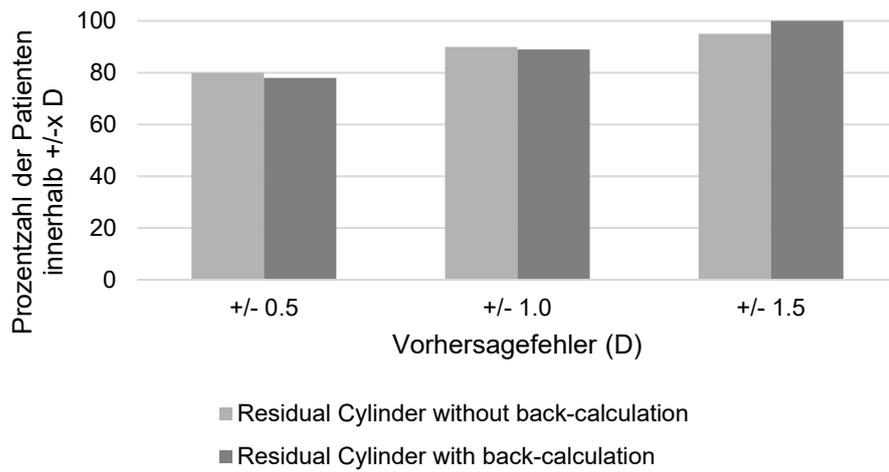


Abbildung 13: Der Anteil der Patienten innerhalb $x D$ des Vorhersagefehlers (in Prozent %)

5. Diskussion

Diese Studie analysiert das refraktive und visuelle Ergebnis nach der Neuausrichtung einer fehlausgerichteten torischen IOL inklusive eines Vergleichs der Neuausrichtung mit und ohne Rückberechnung der Achsenlage. Die Operation der Neuausrichtung korrigiert fehlausgerichtete torische IOLs bei gleichzeitiger Korrektur chirurgisch induzierter Veränderungen der Hornhautstruktur. In einer Studie zeigen Podvin et al., dass 0,98 % von den ausgewerteten 8.229 Patienten eine Fehlausrichtung aufweisen.⁷⁸ Dieser Prozentsatz variierte jedoch signifikant zwischen bestimmten torischen Linsenherstellern und Modellen. In der oben genannten Studie berichtet die Arbeitsgruppe über eine deutlich höhere Fehlausrichtung von Tecnis® Toric IOLs als AcrySof® Toric IOLs. Beide hatten höhere Raten als die Staar® Toric- und Trulign® Toric-Linse, wobei die Verfügbarkeit und Implantation von torischen IOLs höherer Zylinderstärke von Tecnis- und AcrySof- wahrscheinlich dazu beitrug. Die AcrySof Toric IOL scheint seltener als die Tecnis Toric IOL einen Restastigmatismus zu verursachen. Die Tecnis Toric IOL scheint eher gegen den Uhrzeigersinn zu rotieren. Bei den AcrySof Toric-, Trulign® Toric- oder Staar Toric-IOLs wurde keine solche Tendenz beobachtet. In unserer Arbeit wurden die einzelnen Linsenmodelle gegenübergestellt und es zeigte sich eine leichte Tendenz zur Rotation gegen den Uhrzeigersinn, jedoch ohne signifikant zu sein.⁷⁸

Frühere Studien haben eine Inzidenz von 0,65–7,41 % für eine postoperative behandlungsbedürftige Rotation aufgewiesen, was mit der Inzidenz dieser Studie von 3,23 % übereinstimmt.^{2,55,67,68} Die Ergebnisse nach einer Re-Rotation wurden von Oshika et al. in einer retrospektiven, multizentrischen Fallserie in Japan untersucht.⁷⁹ Die Prozentzahl der Repositionen betrug 0,65 % aller 6.431 analysierten Patienten. In allen 42 Fällen wurde die torische IOL auf die zum Zeitpunkt der Kataraktoperation geplante Achse neu ausgerichtet. Sie stellten eine Restfehlausrichtung von $8,8^\circ \pm 9,7^\circ$ sieben Wochen nach der Neuausrichtung fest, was etwas höher ist als die gegenwärtige Restausrichtung von $7,32^\circ \pm 12,57^\circ$. Der Restzylinder war mit $1,1 \pm 0,8$ D wiederum etwas höher als das Ergebnis dieser Studie mit $0,83 \pm 0,81$ D für alle Augen und mit

0,9 ± 0,90 D für die konventionelle Gruppe (Gruppe 1). Die Repositionierungsoperation wurde durchschnittlich 9,9 ± 7,5 Tage (0 bis 30 Tage) nach der primären Kataraktoperation durchgeführt. Die visuellen Ergebnisse wurden in der oben genannten Studie nicht untersucht. In unserer Studie hatte die Rotation deutlich später stattgefunden: postoperativ nach durchschnittlich 86,54 ± 157,99 Tagen.

In einer Übersichtsarbeit von M. Kaur et al., die die Ergebnisse von 18 Studien über die Implantation einer torischen Linse evaluierte, wird über das refraktive Ergebnis berichtet. In 85,52 % der Fälle landeten die Patienten innerhalb der gewünschten Zielfraktion von ± 0,5 D und 95,36 % der Patienten innerhalb ± 1 D. Das sphärische Äquivalent aller Linsen in unserer Arbeit vor der Rotation lag bei -0,19 D und 51 % der Patienten lagen postrotatorisch innerhalb ± 0,5 D des Emmetropiewertes. Nach der Rotationsoperation wurde das sphärische Äquivalent auf -0,18 reduziert und 59 % der Patienten lagen innerhalb ± 0,5 D. Nach der Neuausrichtung landeten 84 % aller Patienten bei einem sphärischen Äquivalent von ± 1 D.⁵¹

Bis heute gibt es keine Richtlinie für den optimalen Zeitpunkt für eine Operation zur Neuausrichtung. Diese wird individuell vom Ophthalmochirurgen indiziert. Ebenso gibt es keine klare Richtlinie über den minimalen Grad der Fehlrotation, bei der eine Operation zur Neuausrichtung indiziert ist. Die Indikation wird oft bei einer Rotation von über 5° gestellt oder wenn der Patient über eine unzufriedenstellende Sehschärfe berichtet. Eine Diskrepanz zwischen gezielter und tatsächlicher postoperativer Refraktion kann auch ein Grund für die Rotationsoperation sein. Es gibt unterschiedliche Meinungen hinsichtlich des optimalen Zeitpunkts einer Neuausrichtung der torischen IOL nach der Linsenoperation. Manche Chirurgen bevorzugen 1–3 Wochen abzuwarten und empfehlen eine Re-Rotation erst, wenn ein corneales Ödem oder weitere Bewegungen im Kapselsack als Faktoren eines refraktiven Fehlers ausgeschlossen werden können. Weitere Argumente, dass Abwarten nach dem primären Eingriff sinnvoll wäre, sind mit der Veränderung und Kontraktion des Kapselsackes nach der Entfernung der natürlichen Linse und Implantation einer Kunstlinse verbunden. Die Dicke der Kunstlinse beträgt etwa 1/4 der zentralen Dicke der natürlichen Linse.⁸⁰ Dieser Unterschied in der Linsendicke zwischen

natürlicher und künstlicher IOL führt postoperativ zu einer Kontraktion des Kapselsackes und dadurch zur Stabilisierung der torischen Linse im Kapselsack. Andere Chirurgen planen die Rotationsoperation so früh wie möglich, um die Patientenzufriedenheit zu steigern und die Erwartungen des Patienten zu respektieren. Ein anderes Argument für längeres Abwarten nach dem primären Eingriff ist der sich noch ändernde Wert des chirurgisch induzierten Astigmatismus (SIA). Dieser entsteht durch Brechungsänderung im Rahmen der Wundheilung im Bereich der cornealen Inzisionen. Fernández et al. führten eine retrospektive Auswertung mit 104 rechten und 104 linken Augen durch. Die Hälfte dieser hatten eine femtosekundenlaserassistierte, die andere Hälfte eine manuelle Phakoemulsifikation bei der Linsenoperation. Der mittlere SIA betrug für das rechte Auge 0,14 D bei 65° (Phakoemulsifikation) und 0,24 D bei 92° (Femtosekundenlaser) ($p > 0,05$) und für das linke Auge 0,15 D bei 101° (Phakoemulsifikationsgruppe) und 0,19 D bei 104° (Femtosekundenlasergruppe) ($p > 0,05$). Die orthogonale Komponente des chirurgisch induzierten Astigmatismus korrelierte mit der präoperativen orthogonalen Komponente des Hornhautastigmatismus.⁸¹

Ferreira et al. stellten in deren Arbeit einen niedrigeren Wert des SIA bzw. einen Abflachungseffekt in der Femtosekundenlasergruppe im Vergleich zur konventionellen Kataraktchirurgie (Phakoemulsifikation) fest. Diese Tendenz war jedoch nicht signifikant. Die temporalen und schrägen Inzisionen führten zu einem Abflachungseffekt von -0,11 bzw. -0,21 D in der Femtosekundenlasergruppe und -0,13 bzw. -0,34 D in der manuellen Phakoemulsifikationsgruppe. Die Augen in der Femtosekundenlasergruppe zeigten weniger Abweichung von der beabsichtigten Länge des chirurgischen Schnittes, Endotheldysfunktion und Descemetablösungen.⁸² Bei allen Patienten in unserer Studie wurde eine Femtosekundenlaser-Kataraktoperation durchgeführt, sodass wir die konventionelle mit der femtosekundenlasergestützten Operation nicht vergleichen können.

Bei 17 der 39 Augen in der von uns durchgeführten Studie fand die Neuausrichtung in den ersten drei Wochen nach der Linsenoperation statt. Ein besseres refraktives Ergebnis nach dieser frühen Neuausrichtung konnte nicht bestätigt werden. Die Indikation zur Neuausrichtung wurde bei jedem Patienten

individuell gestellt und erfolgte in einigen Fällen viel später als drei Wochen nach dem primären Linseneingriff. Der korrigierte Visus der Patienten, die eine frühere Rotation bekamen und der Patienten, die nach der dritten Woche der primären Linsenoperation die Rotation bekamen, hatte einen mittleren Wert von 0,14 LogMAR.

Die refraktiven und visuellen Ergebnisse nach der Neuausrichtung auf eine neu bestimmte Achse mit Hilfe eines Rückrechners wurden zuvor noch nicht publiziert. In dieser Studie zeigte die Vektoranalyse mittels *astigmatismfix.com* eine Übereinstimmung mit den gemessenen Ergebnissen und einen besonders niedrigen Vorhersagefehler für den Restzylinder.

Die retrospektive Auswertung der Eingabedaten des Rückrechners *astigmatismfix.com* ergab, dass die Durchführung einer Neuausrichtung auf der Grundlage der Ergebnisse des Rückrechners in 90 % der Fälle wahrscheinlich vorteilhaft ist, selbst in den 30 %, die sich an der ursprünglich berechneten Achse orientieren.^{68,83} Der mittlere Restastigmatismus aller in den Rückrechner eingegebenen Fälle lag bei 1,89 D, was mit dem postoperativen Restastigmatismus von $1,87 \pm 2,28$ D übereinstimmt. Im Median wurde eine erwartete Reduktion von 54 % vorgeschlagen. In der vorliegenden Studie zeigte die Rückberechnungsgruppe eine Abnahme des Restzylinders von $1,88 \pm 1,53$ D auf $0,76 \pm 0,72$ D, was einer Reduktion des Mittelwertes um 60 % entspricht.

Der Vergleich von niedriger (< 2 D) und hoher (≥ 2 D) IOL-Zylinderstärke zeigte eine geringere postoperative Rotation der IOL und einen höheren Restastigmatismus bei IOL mit hoher Zylinderstärke. Das refraktive und visuelle Ergebnis nach der Neuausrichtung war bei Augen mit IOL mit niedriger Zylinderstärke besser als bei IOL mit hoher Zylinderstärke und zeigte einen Restastigmatismus von $\leq 0,75$ D, sowohl in Ausrichtung zur ursprünglichen Achse als auch in Ausrichtung zur Achse, die durch Rückberechnung bestimmt wurde. Berdahl et al. zeigten in ihrer Studie, in der sie die Eigenschaften des Rückrechners *astigmatismfix.com* auswerteten, ähnliche Ergebnisse. Sie fanden heraus, dass eine niedrige IOL-Zylinderstärke von $< 1,5$ D mit einer höheren Wahrscheinlichkeit einherging, dass der Restzylinder nach der Neuausrichtung bei $< 0,5$ D lag.^{83,84}

In der Untergruppenanalyse zeigten alle IOL mit Zylinderstärke nach Ausrichtung mit Rückberechnung einen niedrigeren Restzylinder. Bei IOLs mit hoher Zylinderstärke gab es einen höheren Unterschied zwischen beiden Methoden (27 % vs. 9 %), was einen hohen Vorteil der Verwendung eines Rückrechners speziell für diese Untergruppe impliziert. Betrachtet man die Vektoranalyse für alle IOLs, so ergab sich eine Abnahme des Vektors nach der Ausrichtung mit Rückberechnung.

Zu den Einschränkungen der Studie gehört das retrospektive Studiendesign mit nicht standardisiertem Zeitpunkt der Neuausrichtung. Eine weitere Einschränkung ist die inhomogene Verteilung der Linsenmodelle. Eine andere Studie zeigt einen statistischen Unterschied in der Häufigkeit der Rotation in Zusammenhang mit dem Linsenmodell und eine Rolle des Herstellers bei der Stabilität der IOL.⁷⁸ Da der Rückrechner erst seit 2017 an unserer Klinik eingesetzt wird, besteht eine zusätzliche chronologische Verteilung der Patienten ohne und mit Rückrechnung. Es wäre wünschenswert gewesen, wenn die Patienten nach dem Zufallsprinzip entweder der Neuausrichtung auf die ursprüngliche Achse oder der Neuausrichtung auf eine rückgerechnete Achse zugeordnet worden wären. Zudem ist die Stichprobengröße wegen der seltenen Inzidenz der Notwendigkeit zur Neuausrichtung relativ klein. Des Weiteren wurden die Zielachsen mit dem Winkel des Spaltlampenstrahls gemessen, was nicht so genau ist wie andere Methoden. Im letzten Jahr hatten wir in der Augenklinik in Frankfurt am Main auf die manuelle, präoperative Markierung der Achsenlage verzichtet. Stattdessen benutzen wir nur den digitalen Verion-tracking-Marker des Operationsmikroskops LX3 (Firma Alcon).

Zukünftige prospektive randomisierte Untersuchungen der refraktiven und visuellen Ergebnisse und die Auswertung des Rückrechners wären von großem Interesse, um ein besseres Verständnis für die Neuausrichtung von torischen IOLs zu erreichen und Richtlinien für das Management der Neuausrichtung zu entwickeln.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Neuausrichtung von fehlausgerichteten torischen IOLs die Sehschärfe verbessert und Restbrechungsfehler, insbesondere Restzylinder, reduziert. Die Durchführung

einer Rückberechnung von der Neuausrichtung führt zu einem besseren refraktiven Ergebnis bei IOL mit höherer Zylinderstärke.

6. Zusammenfassung

Hintergrund und Ziel der Studie

Das Ziel der Studie ist die Beurteilung des refraktiven und visuellen Ergebnisses von Patienten mit fehlausgerichteten torischen IOLs nach operativer Neuausrichtung, mit und ohne Rückberechnung der torischen Achse nach Implantation der IOL.

Methoden

Dies ist eine retrospektive Analyse von 39 Patienten, die sich von August 2013 bis Dezember 2019 an der Klinik für Augenheilkunde der Goethe-Universität Frankfurt am Main einer zweiten Operation zur Neuausrichtung einer fehlausgerichteten torischen IOL unterzogen haben. Die zweite Operation zur Korrektur der Achsenlage wurde auf zwei Weisen durchgeführt: In der ersten Gruppe wurde auf die primär berechnete Achse rotiert und in der zweiten Gruppe wurde die Rotation auf eine neu berechnete Achse mit dem Rückrechner von *astigmatifix.com* vorgenommen.

Ergebnisse

In dieser retrospektiven Studie wurden 39 Augen von 39 Patienten eingeschlossen. Die Ergebnisse nach der ersten Operation (die Linsenoperation) zeigte eine Besserung der (BCVA) von $0,28 \pm 0,22$ logMAR (20/40) auf $0,15 \pm 0,14$ logMAR (20/32). Nach der Linsenoperation zeigten die torischen IOLs durchschnittlich eine postoperative Fehlstellung von $25,69^\circ \pm 26,06^\circ$. Verglichen vor und nach der Rotation der torischen IOL blieb der BCVA unverändert bei $0,14 \pm 0,14$ logMAR (20/32), während sich der UDVA signifikant von $0,39 \pm 0,29$ logMAR (20/50) auf $0,27 \pm 0,18$ logMAR (20/40) verbesserte. Das refraktive Ergebnis zeigte eine Reduktion sowohl in der Restsphäre sowie in dem Zylinder. Die Ergebnisse der Gruppenanalyse demonstrierte für die erste Gruppe (Neuausrichtung auf die präoperativ berechnete Achse) eine postoperative UDVA $0,24 \pm 0,16$ logMAR mit einem Zylinder von $0,90 \pm 0,90$ D. In der zweiten Gruppe (Ausrichtung auf eine zurückberechnete Achse) betrug die UDVA $0,32 \pm 0,20$ logMAR mit einem Zylinder von $0,76 \pm 0,72$ D. Die IOLs mit

hoher Zylinderstärke (≥ 2 D) zeigten bei der Rückberechnung eine stärkere Abnahme des Restzylinders als IOL mit niedriger Zylinderstärke (< 2 D) (27 % vs. 9 %). Der mittlere sphärische Äquivalent-Vorhersagefehler der Rückberechnung betrug $0,54 \pm 0,55$ D.

Schlussfolgerung

Die Neuausrichtung von fehlausgerichteten torischen IOLs verbessert die Sehschärfe und reduziert verbleibende Brechungsfehler. Insbesondere bei IOL mit hoher Zylinderstärke kann ein besseres refraktives Ergebnis erzielt werden, wenn vor der Neuausrichtung eine Rückberechnung durchgeführt wird.

7. Summary

Background and aim of the study

The purpose of this study is to evaluate the refractive and visual outcomes of patients with misaligned toric IOLs after surgical realignment, with and without recalculation of the toric axis after implantation of the IOL.

Methods

This is a retrospective analysis of 39 patients who underwent a second surgery for realignment of a misaligned toric IOL from August 2013 to December 2019 at the Department of Ophthalmology, Goethe University, Frankfurt am Main, Germany. The second surgery to correct the axial position was performed in two ways: In the first group, rotation was performed to the primary calculated axis, and in the second group, rotation was performed to a recalculated axis using the *astigmatifix.com* back calculator.

Results

In this retrospective study, 39 eyes of 39 patients were included. The results after the first surgery (the lens surgery) showed an improvement in (BCVA) from 0.28 ± 0.22 logMAR (20/40) to 0.15 ± 0.14 logMAR (20/32). After lens surgery, toric IOLs showed an average postoperative misalignment of $25.69^\circ \pm 26.06$. Comparing before and after toric IOL rotation, BCVA remained unchanged at 0.14 ± 0.14 logMAR (20/32), while UDVA improved significantly from 0.39 ± 0.29 logMAR (20/50) to 0.27 ± 0.18 logMAR (20/40). The refractive outcome showed a reduction in both the residual sphere and the cylinder. The results of the group analysis demonstrated for the first group (realignment to the preoperatively calculated axis) a postoperative UDVA 0.24 ± 0.16 logMAR with a cylinder of 0.90 ± 0.90 D. In the second group (alignment to a recalculated axis), UDVA was 0.32 ± 0.20 logMAR with a cylinder of 0.76 ± 0.72 D. The IOLs with high cylinder power (≥ 2 D) showed a greater decrease in residual cylinder on back calculation than IOLs with low cylinder power (< 2 D) (27% vs. 9%). The mean spherical equivalent prediction error of the back calculation was 0.54 ± 0.55 D.

Conclusion

Realignment of misaligned toric IOLs improves visual acuity and reduces residual refractive error. For IOLs with high cylinder power in particular, a better refractive outcome can be achieved if back calculation is performed before realignment.

8. Literaturverzeichnis

1. Kataraktoperation. <https://www.aqua-institut.de/projekte/kataraktoperation/> Published Oktober 2010. Accessed November 8, 2020.
2. Shimizu K, Misawa A, Suzuki Y. Toric intraocular lenses: Correcting astigmatism while controlling axis shift. *Journal of Cataract & Refractive Surgery*. 1994;20(5):523-526. doi:10.1016/S0886-3350(13)80232-5
3. Grehn F. *Augenheilkunde*. 31st ed. Springer-Verlag; 2012. doi:10.1007/978-3-642-11333-8
4. Jack Kanski, Brad Bowling. *Kanski's Clinical Ophthalmology - 8th Edition*. 8th ed. Elsevier Inc.; Published 2015. Accessed November 8, 2020. <https://www.elsevier.com/books/kanskis-clinical-ophthalmology/kanski/978-0-7020-5572-0>
5. Petrash JM. Aging and Age-Related Diseases of the Ocular Lens and Vitreous Body. *Invest Ophthalmol Vis Sci*. 2013;54(14):ORSF54-ORSF59. doi:10.1167/iovs.13-12940
6. Höber R. Der dioptrische Apparat des Auges. In: Höber R, ed. *Lehrbuch der Physiologie des Menschen*. Lehrbuch der Physiologie des Menschen. Springer; 1934:489-511. doi:10.1007/978-3-642-91709-7_29
7. Anton-Martin Christof. Dioptrischer Apparat. DocCheck Flexikon. Accessed November 8, 2020. https://flexikon.doccheck.com/de/Dioptrischer_Apparat
8. Tomlinson A. A Clinical Study of the Central and Peripheral Thickness and Curvature of the Human Cornea. *Acta Ophthalmologica*. 1972;50(1):73-82. doi:<https://doi.org/10.1111/j.1755-3768.1972.tb05643.x>
9. Espana EM, Birk DE. Composition, structure and function of the corneal stroma. *Experimental Eye Research*. 2020;198:108137. doi:10.1016/j.exer.2020.108137
10. Charman WN. The eye in focus: accommodation and presbyopia. *Clinical and Experimental Optometry*. 2008;91(3):207-225. doi:<https://doi.org/10.1111/j.1444-0938.2008.00256.x>
11. Croft MA, Glasser A, Kaufman PL. Accommodation and Presbyopia. *International Ophthalmology Clinics*. 2001;41(2):33-46.
12. Basic and Clinical Science Course, Section 2: Fundamentals and Principles of Ophthalmology by American Academy of Ophthalmology. Publisches 2012-2013, Accessed December 12, 2020. <https://www.goodreads.com/book/show/15954658-2012-2013-basic-and-clinical-science-course-section-2>

13. Wade NJ, Swanston M. *Visual Perception: An Introduction*. Psychology Press; 2013.
14. Atchison DA. Accommodation and presbyopia. *Ophthalmic and Physiological Optics*. 1995;15(4):255-272. doi:<https://doi.org/10.1046/j.1475-1313.1995.9500020e.x>
15. Kohnen T, Lwowski C, Hinzelmann L, et al. Presbyopia Correction in Astigmatic Eyes Using a Toric Trifocal Intraocular Lens With Quadrifocal Technology. *J Refract Surg*. 2020;36(10):638-644. doi:10.3928/1081597X-20200729-04
16. Williams KM, Verhoeven VJM, Cumberland P, et al. Prevalence of refractive error in Europe: the European Eye Epidemiology (E(3)) Consortium. *Eur J Epidemiol*. 2015;30(4):305-315. doi:10.1007/s10654-015-0010-0
17. Villegas E, Alcón E, Artal P. Minimum amount of astigmatism that should be corrected. *Journal of cataract and refractive surgery*. 2014;40:13-19. doi:10.1016/j.jcrs.2013.09.010
18. Woltsche N, Werkl P, Posch-Pertl L, Ardjomand N, Frings A. Astigmatismus. *Ophthalmologe*. 2019;116(3):293-304. doi:10.1007/s00347-019-0865-7
19. Goggin M. Astigmatism: Optics, Physiology and Management. Chapter 4, 60-66
20. Read SA, Collins MJ, Carney LG. A review of astigmatism and its possible genesis. *Clinical and Experimental Optometry*. 2007;90(1):5-19. doi:<https://doi.org/10.1111/j.1444-0938.2007.00112.x>
21. Kessel L, Andresen J, Tendal B, Erngaard D, Flesner P, Hjortdal J. Toric Intraocular Lenses in the Correction of Astigmatism During Cataract Surgery: A Systematic Review and Meta-analysis. *Ophthalmology*. 2016;123(2):275-286. doi:10.1016/j.ophtha.2015.10.002
22. Mendicute J, Irigoyen C, Aramberri J, Ondarra A, Montés-Micó R. Foldable toric intraocular lens for astigmatism correction in cataract patients. *Journal of Cataract & Refractive Surgery*. 2008;34(4):601-607. doi:10.1016/j.jcrs.2007.11.033
23. Hoffmann PC, Hütz WW. Analysis of biometry and prevalence data for corneal astigmatism in 23,239 eyes. *J Cataract Refract Surg*. 2010;36(9):1479-1485. doi:10.1016/j.jcrs.2010.02.025
24. Ferrer-Blasco T, Montés-Micó R, Peixoto-de-Matos SC, González-Méijome JM, Cerviño A. Prevalence of corneal astigmatism before cataract surgery. *J Cataract Refract Surg*. 2009;35(1):70-75. doi:10.1016/j.jcrs.2008.09.027
25. Löffler F, Böhm M, Herzog M, Petermann K, Kohnen T. Tomographic Analysis of Anterior and Posterior and Total Corneal Refractive Power Changes After Femtosecond Laser-Assisted Keratotomy. *Am J Ophthalmol*. 2017;180:102-109. doi:10.1016/j.ajo.2017.05.015

26. Kohnen T, Löffler F, Herzog M, Petermann K, Böhm M. Tomographic analysis of anterior and posterior surgically induced astigmatism after 2.2 mm temporal clear corneal incisions in femtosecond laser-assisted cataract surgery. *J Cataract Refract Surg.* 2019;45(11):1602-1611. doi:10.1016/j.jcrs.2019.06.010
27. Asbell PA, Dualan I, Mindel J, Brocks D, Ahmad M, Epstein S. Age-related cataract. *The Lancet.* 2005;365(9459):599-609. doi:10.1016/S0140-6736(05)17911-2
28. Benedek GB, Pande J, Thurston GM, Clark JI. Theoretical and experimental basis for the inhibition of cataract. *Progress in Retinal and Eye Research.* 1999;18(3):391-402. doi:10.1016/S1350-9462(98)00023-8
29. Delaye M, Clark JI, Benedek GB. Identification of the scattering elements responsible for lens opacification in cold cataracts. *Biophys J.* 1982;37(3):647-656.
30. Reidy A, Minassian DC, Vafidis G, et al. Prevalence of serious eye disease and visual impairment in a north London population: population based, cross sectional study. *BMJ.* 1998;316(7145):1643-1646. doi:10.1136/bmj.316.7145.1643
31. Global and regional prevalence of age-related cataract: a comprehensive systematic review and meta-analysis.
32. Thylefors B, Jr LTC, Konyama K, et al. A simplified cataract grading system The WHO Cataract Grading Group. *Ophthalmic Epidemiology.* 2002;9(2):83-95. doi:10.1076/ojep.9.2.83.1523
33. Thomas Kohnen, Martin Baumeister, Daniel Kook, Oliver K. Klaproth, Christian Ohrloff. Kataraktchirurgie mit Implantation einer Kunstlinse. *Deutsches Ärzteblatt.* 2009;106(43):695-702. doi:10.3238/arztebl.2009.0695
34. Isawumi MA, Kolawole OU, Hassan MB. Couching Techniques for Cataract Treatment in Osogbo, South West Nigeria. *Ghana Med J.* 2013;47(2):64-69.
35. Jaffe NS, Clayman HM, Jaffe MS. A comparison of ICCE-Binkhorst intraocular lens and ECCE-posterior chamber intraocular lens, thirty-four to forty months postoperatively. *American Intra-Ocular Implant Society Journal.* 1982;8(2):128-130. doi:10.1016/S0146-2776(82)80046-3
36. Davis G. The Evolution of Cataract Surgery. *Mo Med.* 2016;113(1):58-62.
37. Bödemann M, Kohnen T. Phacofragmentation. In: Schmidt-Erfurth U, Kohnen T, eds. *Encyclopedia of Ophthalmology.* Springer; 2016:1-2. doi:10.1007/978-3-642-35951-4_472-3
38. Kanellopoulos AJ, Asimellis G. Standard manual capsulorhexis / Ultrasound phacoemulsification compared to femtosecond laser-assisted capsulorhexis and lens fragmentation in clear cornea small incision cataract surgery. *Eye Vis (Lond).* 2016;3. doi:10.1186/s40662-016-0050-x

39. Duguid IGM, Claoué CMP, Thamby-Rajah Y, Allan BDS, Dart JKG, Steele ADM. Topical anaesthesia for phacoemulsification surgery. *Eye*. 1995;9(4):456-459. doi:10.1038/eye.1995.106
40. Lawless M, Bali SJ, Hodge C, Roberts TV, Chan C, Sutton G. Outcomes of Femtosecond Laser Cataract Surgery With a Diffractive Multifocal Intraocular Lens. *J Refract Surg*. 2012;28(12):859-864. doi:10.3928/1081597X-20121115-02
41. Abouzeid H, Ferrini W. Femtosecond-laser assisted cataract surgery: a review. *Acta Ophthalmologica*. 2014;92(7):597-603. doi:https://doi.org/10.1111/aos.12416
42. Nagy ZZ, Dunai Á, Kránitz K, et al. Evaluation of Femtosecond Laser-Assisted and Manual Clear Corneal Incisions and Their Effect on Surgically Induced Astigmatism and Higher-Order Aberrations. *J Refract Surg*. 2014;30(8):522-525. doi:10.3928/1081597X-20140711-04
43. Roberts TV, Lawless M, Bali SJ, Hodge C, Sutton G. Surgical Outcomes and Safety of Femtosecond Laser Cataract Surgery: A Prospective Study of 1500 Consecutive Cases. *Ophthalmology*. 2013;120(2):227-233. doi:10.1016/j.ophtha.2012.10.026
44. Ruíz-Mesa R, Carrasco-Sánchez D, Díaz-Álvarez SB, Ruíz-Mateos MÁ, Ferrer-Blasco T, Montés-Micó R. Refractive Lens Exchange with Foldable Toric Intraocular Lens. *American Journal of Ophthalmology*. 2009;147(6):990-996.e1. doi:10.1016/j.ajo.2009.01.004
45. Alio JL, Grzybowski A, El Aswad A, Romaniuk D. Refractive lens exchange. *Surv Ophthalmol*. 2014;59(6):579-598. doi:10.1016/j.survophthal.2014.04.004
46. Nicula CA, Popescu R, Rednik AM, Nicula D, Bulboaca AE, Stanescu I. Refractive Lens Exchange in Hyperopic Presbyopes with the Acrysof IQ Panoptix Intraocular Lens: One-Year Results and Analysis of the Literature. *Ther Clin Risk Manag*. 2020;16:1125-1137. doi:10.2147/TCRM.S279065
47. Zur Entwicklungsgeschichte der Intraokularlinsen. *Der Ophthalmologe*. 2001;98:1017-1028. doi:10.1007/s003470170020
48. Xu Z. Toric Intraocular Lenses. *Intraocular Lens*. Published online November 25, 2019. doi:10.5772/intechopen.90153
49. Bellucci R. An Introduction to Intraocular Lenses: Material, Optics, Haptics, Design and Aberration. In: ; 2013. doi:10.1159/000350902
50. Kohnen T, Klaproth OK. *Intraokularlinsen - eine Standortbestimmung*. Uni-Med Verlag AG; 2016.
51. Kaur M, Shaikh F, Falera R, Titiyal JS. Optimizing outcomes with toric intraocular lenses. *Indian Journal of Ophthalmology*. 2017;65(12):1301. doi:10.4103/ijo.IJO_810_17

52. Al-Shymali O, Alió Del Barrio JL, McAlinden C, Canto M, Primavera L, Alio JL. Multifocal intraocular lens exchange to monofocal for the management of neuroadaptation failure. *Eye Vis (Lond)*. 2022;9(1):40. doi:10.1186/s40662-022-00311-4
53. Meikies D, van der Mooren M, Guthoff RF, Stachs O. [Comparison of dysphotopsia effects in phakic and pseudophakic eyes using Rostock glare perimeter]. *Klin Monbl Augenheilkd*. 2013;230(12):1213-1219. doi:10.1055/s-0033-1360125
54. Masket S, Fram NR. Pseudophakic Dysphotopsia: Review of Incidence, Cause, and Treatment of Positive and Negative Dysphotopsia. *Ophthalmology*. 2021;128(11):e195-e205. doi:10.1016/j.ophtha.2020.08.009
55. Christopher Kent, Senior. Toric IOLs: Nailing The Alignment. *Review of Ophthalmology*. Published online January 22, 2013. Accessed November 14, 2020. <https://www.reviewofophthalmology.com/article/toric-iols-nailing-the-alignment>
56. Son HS, Yildirim T, Khoramnia R, Labuz G, Mayer C, Auffarth GU. Implantation of a small-aperture intraocular lens and a partial aniridia implant in eyes with traumatic iris defects. *Am J Ophthalmol Case Rep*. 2020;18. doi:10.1016/j.ajoc.2020.100673
57. Yorston D. Intraocular Lens (IOL) Implants in Children. *Community Eye Health*. 2001;14(40):57-58.
58. Schmitz S, Dick H, Krummenauer F, Pfeiffer N. Endophthalmitis in cataract surgery: Results of a German survey. *Ophthalmology*. 1999;106:1869-1877. doi:10.1016/S0161-6420(99)90395-0
59. Fallpauschalenbezogene Krankenhausstatistik (DRG-Statistik) Diagnosen, Prozeduren, Fallpauschalen und Case Mix der vollstationären Patientinnen und Patienten in Krankenhäusern. https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Gesundheit/Krankenhaeuser/Publikationen/Downloads-Krankenhaeuser/fallpauschalen-krankenhaus-2120640167004.pdf?__blob=publicationFile, Accessed November 15, 2020.
60. Nentwich MM, Ta CN, Kreutzer TC, et al. Incidence of postoperative endophthalmitis from 1990 to 2009 using povidone-iodine but no intracameral antibiotics at a single academic institution. *J Cataract Refract Surg*. 2015;41(1):58-66. doi:10.1016/j.jcrs.2014.04.040
61. Creuzot-Garcher CP, Mariet AS, Benzenine E, et al. Is combined cataract surgery associated with acute postoperative endophthalmitis? A nationwide study from 2005 to 2014. *British Journal of Ophthalmology*. 2019;103(4):534-538. doi:10.1136/bjophthalmol-2018-312171
62. Gandhi JS. Cystoid macular edema after cataract surgery. *Journal of Cataract & Refractive Surgery*. 2018;44(12):1536. doi:10.1016/j.jcrs.2018.09.014

63. Llop SM, Papaliadis GN. Cataract Surgery Complications in Uveitis Patients: A Review Article. *Seminars in Ophthalmology*. 2018;33(1):64-69. doi:10.1080/08820538.2017.1353815
64. Hayashi K, Hayashi H. Posterior capsule opacification in the presence of an intraocular lens with a sharp versus rounded optic edge. *Ophthalmology*. 2005;112(9):1550-1556. doi:10.1016/j.ophtha.2005.03.024
65. Spalton DJ. Posterior capsular opacification after cataract surgery. *Eye*. 1999;13(3):489-492. doi:10.1038/eye.1999.127
66. Visser N, Nuijts RMMA, de Vries NE, Bauer NJC. Visual outcomes and patient satisfaction after cataract surgery with toric multifocal intraocular lens implantation. *Journal of Cataract & Refractive Surgery*. 2011;37(11):2034-2042. doi:10.1016/j.jcrs.2011.05.041
67. Miyake T, Kamiya K, Amano R, Iida Y, Tsunehiro S, Shimizu K. Long-term clinical outcomes of toric intraocular lens implantation in cataract cases with preexisting astigmatism. *Journal of Cataract & Refractive Surgery*. 2014;40(10):1654-1660. doi:10.1016/j.jcrs.2014.01.044
68. Kramer BA, Berdahl JP, Hardten DR, Potvin R. Residual astigmatism after toric intraocular lens implantation: Analysis of data from an online toric intraocular lens back-calculator. *Journal of Cataract & Refractive Surgery*. 2016;42(11):1595-1601. doi:10.1016/j.jcrs.2016.09.017
69. Felipe A, Artigas JM, Díez-Ajenjo A, García-Domene C, Alcocer P. Residual astigmatism produced by toric intraocular lens rotation. *Journal of Cataract & Refractive Surgery*. 2011;37(10):1895-1901. doi:10.1016/j.jcrs.2011.04.036
70. Menapace RM, Dick HB. Femtosekundenlaser in der Kataraktchirurgie. *Ophthalmologe*. 2014;111(7):624-637. doi:10.1007/s00347-014-3032-1
71. Mahmood AMA, Al-Swailem SA, Behrens A. Clear Corneal Incision in Cataract Surgery. *Middle East African Journal of Ophthalmology*. 2014;21(1):25. doi:10.4103/0974-9233.124084
72. Conrad-Hengerer I, Hengerer F, Schultz T, Dick H. Effect of Femtosecond Laser Fragmentation on Effective Phacoemulsification Time in Cataract Surgery. *Journal of refractive surgery (Thorofare, NJ: 1995)*. 2012;28:879-884. doi:10.3928/1081597X-20121116-02
73. Donaldson KE, Braga-Mele R, Cabot F, et al. Femtosecond laser-assisted cataract surgery. *J Cataract Refract Surg*. 2013;39(11):1753-1763. doi:10.1016/j.jcrs.2013.09.002
74. Ang RET, Quinto MMS, Cruz EM, Rivera MCR, Martinez GHA. Comparison of clinical outcomes between femtosecond laser-assisted versus conventional phacoemulsification. *Eye Vis (Lond)*. 2018;5. doi:10.1186/s40662-018-0102-5

75. Parikshit Gogat. Comparison of various techniques for cataract surgery, their efficacy, safety, and cost. *Oman J Ophthalmol.* 2010;3(3):105-106. doi:10.4103/0974-620X.71880
76. Kathryn M.Hatch T. Femtosecond laser–assisted compared with standard cataract surgery for removal of advanced cataracts. *Journal of Cataract & Refractive Surgery.* 2015;41(9):1833-1838. doi:10.1016/j.jcrs.2015.10.040
77. Chen X, Xiao W, Ye S, Chen W, Liu Y. Efficacy and safety of femtosecond laser-assisted cataract surgery versus conventional phacoemulsification for cataract: a meta-analysis of randomized controlled trials. *Scientific Reports.* 2015;5(1):13123. doi:10.1038/srep13123
78. Potvin R, Kramer BA, Hardten DR, Berdahl JP. Toric intraocular lens orientation and residual refractive astigmatism: an analysis. *Clin Ophthalmol.* 2016;10:1829-1836. doi:10.2147/OPHTH.S114118
79. Oshika T, Inamura M, Inoue Y, et al. Incidence and Outcomes of Repositioning Surgery to Correct Misalignment of Toric Intraocular Lenses. *Ophthalmology.* 2018;125(1):31-35. doi:10.1016/j.ophtha.2017.07.004
80. Zeng Y, Liu Y, Liu X, et al. Comparison of Lens Thickness Measurements Using the Anterior Segment Optical Coherence Tomography and A-scan Ultrasonography. *Invest Ophthalmol Vis Sci.* 2009;50(1):290-294. doi:10.1167/iovs.07-1216
81. Fernández J, Rodríguez-Vallejo M, Martínez J, Tauste A, Piñero DP. Prediction of surgically induced astigmatism in manual and femtosecond laser-assisted clear corneal incisions. *Eur J Ophthalmol.* 2018;28(4):398-405. doi:10.1177/1120672117747017
82. Ferreira TB, Ribeiro FJ, Pinheiro J, Ribeiro P, O'Neill JG. Comparison of Surgically Induced Astigmatism and Morphologic Features Resulting From Femtosecond Laser and Manual Clear Corneal Incisions for Cataract Surgery. *J Refract Surg.* 2018;34(5):322-329. doi:10.3928/1081597X-20180301-01
83. Berdahl JP, Hardten DR, Kramer BA, Potvin R. Effect of astigmatism on visual acuity after multifocal versus monofocal intraocular lens implantation. *Journal of Cataract & Refractive Surgery.* 2018;44(10):1192-1197. doi:10.1016/j.jcrs.2018.06.048
84. Berdahl JP, Hardten DR. Residual astigmatism after toric intraocular lens implantation. *Journal of Cataract & Refractive Surgery.* 2012;38(4):730-731. doi:10.1016/j.jcrs.2012.01.018

9. Danksagung

An erster Stelle danke ich meinem Doktorvater Prof. Dr. Mehdi Shajari für die Überlassung des Dissertationsthemas und für sein Vertrauen und seine Unterstützung im Laufe des Arbeitsprozesses.

Mein besonderer Dank gilt Prof. Dr. Thomas Kohnen, der mich als Leiter der Klinik für Augenheilkunde immer motiviert hatte, sich weiterzuentwickeln und meinen wissenschaftlichen Weg in der Augenheilkunde zu beginnen.

Einen sehr herzlichen Dank will ich meiner Kollegin Dr. Annika Müller-Kassner aussprechen. Sie war für mich als Kollegin immer sehr hilfsbereit und bei jeder Frage erreichbar.

Ein großes Dankeschön will ich meiner Kollegin Dr. Franziska Löffler für ihre Mühe, Zeit und sehr hohes Engagement bei der Korrektur meiner Doktorarbeit aussprechen.

Der größte Dank gilt meiner Familie. Ich danke meinem Ehemann für seine ehrliche und konstruktiv kritische Wertschätzung, für die Motivation und seinen Beistand. Und immer wieder bin ich meinen Eltern und meinem Bruder für die netten Worte, die geistige Unterstützung, ihre Liebe und ihr Vertrauen in mich und alle meine Vorhaben dankbar. Schließlich möchte ich mich bei meinem Sohn Philipp Edward bedanken, der meine größte Inspiration ist und mir zahlreiche Gründe liefert, die beste Version meiner selbst zu sein.

10. Schriftliche Erklärung

Ich erkläre ehrenwörtlich, dass ich die dem Fachbereich Medizin der Johann Wolfgang Goethe-Universität Frankfurt am Main zur Promotionsprüfung eingereichte Dissertation mit dem Titel

**Refraktives und visuelles Ergebnis nach
Neuausrichtung von rotierten torischen
Intraokularlinsen**

in der Klinik für Augenheilkunde, Universitätsklinikum Frankfurt unter Betreuung und Anleitung von Prof. Dr. Mehdi Shajari mit Unterstützung durch Prof. Dr. Thomas Kohnen ohne sonstige Hilfe selbst durchgeführt und bei der Abfassung der Arbeit keine anderen als die in der Dissertation angeführten Hilfsmittel benutzt habe. Darüber hinaus versichere ich, nicht die Hilfe einer kommerziellen Promotionsvermittlung in Anspruch genommen zu haben.

Ich habe bisher an keiner in- oder ausländischen Universität ein Gesuch um Zulassung zur Promotion eingereicht. Die vorliegende Arbeit wurde bisher nicht als Dissertation eingereicht.

Vorliegende Ergebnisse der Arbeit wurden in folgendem Publikationsorgan veröffentlicht:

Annika Müller-Kassner, Tsvetina Sartory, Michael Müller, Kleopatra Varna-Tigka, Wolfgang J. Mayer, Thomas Kreutzer, Anna Schuh, Siegfried Priglinger, Thomas Kohnen, Mehdi Shajari, Refractive and visual outcome of misaligned toric intraocular lens after operative realignment, American Journal of Ophthalmology, 224:150-157, 2021

(Ort, Datum)

(Unterschrift)