

Aus der Klinik für Augenheilkunde

Universitätsklinikum des Saarlandes, Homburg/Saar

Direktor: Prof. Dr. med. Berthold Seitz

**Torische Intraokularlinsen (intrakapsulär und Add-on) zur  
Behandlung des Astigmatismus nach Keratoplastik**

**Dissertation zur Erlangung des Grades eines Doktors der Medizin der  
Medizinischen Fakultät**

der Universität des Saarlandes

2026

vorgelegt von: Paul Arnold Teping

geboren am: 14.01.1997 in Saarbrücken

Wesentliche Teile dieser Doktorarbeit sind unter dem Titel:

**„Visual and refractive outcomes of intracapsular and add-on toric intraocular lenses in post-keratoplasty astigmatism: a retrospective study”**

im Journal of Cataract and Refractive Surgery (JCRS) 2026 in Druck.

# Inhalt

1	Abkürzungsverzeichnis .....	6
2	Zusammenfassung .....	7
2.1	Zusammenfassung – Deutsch .....	7
2.2	Zusammenfassung – Englisch .....	8
3	Einleitung .....	9
3.1	Der dioptrische Apparat.....	9
3.1.1	Anatomische und physikalische Grundlagen .....	9
3.1.2	Ametropien.....	10
3.2	Astigmatismus.....	11
3.2.1	Allgemein.....	11
3.2.2	Regulärer Astigmatismus .....	12
3.2.3	Irregulärer Astigmatismus .....	14
3.3	Keratoplastik .....	16
3.3.1	Allgemein.....	16
3.3.2	Astigmatismus nach Keratoplastik .....	18
3.4	Intraokularlinsen.....	20
3.4.1	Historie der Linsenoperation.....	20
3.4.2	Historie der torischen IOL.....	21
3.4.3	Funktionsweise der torischen IOL .....	22
3.4.4	Indikationen und Kontraindikationen der torischen IOL .....	26
3.4.5	Die moderne Kataraktoperation mit torischer IOL .....	29
3.4.6	Kalkulation.....	30
3.5	Fragestellung.....	32
4	Patienten und Methodik.....	33
4.1	Patienten.....	33
4.2	Verwendete Untersuchungsmethoden.....	33

4.2.1	Klinisch .....	33
4.2.2	Apparativ .....	34
4.3	Implantierte IOL-Modelle.....	40
4.4	Postoperative Therapie .....	41
4.5	Einschlusskriterien.....	41
4.6	Ausschlusskriterien .....	42
4.7	Statistische Methode .....	42
4.8	Vektoranalyse.....	43
5	Ergebnisse .....	44
5.1	Deskriptive Statistik.....	44
5.1.1	Demographische Daten .....	44
5.1.2	Biometrie .....	48
5.1.3	Korneale Topographie .....	49
5.2	Scheimpflugtomographie.....	50
5.3	Visus .....	55
5.4	Sphärisches Äquivalent .....	57
5.5	Endothelzellzahl .....	59
5.6	Vektoranalyse.....	60
5.7	Komplikationen.....	66
6	Diskussion .....	68
6.1	Visus .....	68
6.2	Sphärisches Äquivalent .....	69
6.3	Endothelzellzahl .....	70
6.4	Vektoranalyse.....	71
6.5	Komplikationen .....	72
6.6	Grauzonen .....	73
6.7	Alternative Therapieoptionen .....	74
6.8	Limitationen.....	76

6.9	Fazit .....	76
7	Literaturverzeichnis .....	77
8	Danksagung .....	88
9	Publikationen .....	89

# 1 Abkürzungsverzeichnis

<b>Abkürzung</b>	<b>Erläuterung</b>
AL	Achsenlänge
AR	Aspect Ratio (= Seitenverhältnis)
AT	Augentropfen
ATR	Against-the-rule
bzw.	beziehungsweise
ca.	circa
CI	Correction Index
D	Dioptrien
DALK	tiefe anteriore lamelläre Keratoplastik
d.h.	das heißt
ELP	Effektive Linsenposition
gr.	griechisch
ICRS	intrastromale korneale Ringsegmente
IOL	Intraokularlinse
KK	Keratokonus
KL	Kontaktlinse
LA	linkes Auge
LASIK	Laser-in-situ-Keratomileusis
MHA	Major Half Axis, große Halbachse
MiHA	Minor Half Axis, kleine Halbachse
MRA	Manifester Refraktiver Astigmatismus
nm	Nanometer
OBL	oblique
OCT	Optische Kohärenztomographie
PKP	perforierende Keratoplastik
PMMA	Polymethylmethacrylat
PRK	photorefraktive Keratektomie
RA	rechtes Auge
SA	Standardabweichung
SAI	Surface Asymmetry Index
SÄ	sphärisches Äquivalent
SIA	Surgically Induced Astigmatism
SICA	Surgically Induced Corneal Astigmatism
SP	Sphärische Brechkraft
SRI	Surface Regularity Index
TCRA	Total Corneal Refractive Astigmatism
TIA	Target Induced Astigmatism
tIOL	torische Intraokularlinse
VKTe	externe Vorderkammertiefe
VKTi	interne Vorderkammertiefe
vs.	Versus
WFA HORMS	Wave Front Aberration Higher Order Root Mean Square
WTR	With-the-rule
z.B.	zum Beispiel
ZMÖ	zystoides Makulaödem
ZP	Zylindrische Brechkraft

## 2 Zusammenfassung

### 2.1 Zusammenfassung – Deutsch

**Hintergrund:** Der residuelle Astigmatismus nach perforierender Keratoplastik (PKP) oder tiefer anterior lamellärer Keratoplastik (DALK) stellt bei klarem kornealem Transplantat die wichtigste Ursache postoperativer Visusminderung und Patientenunzufriedenheit dar. Ziel dieser Arbeit war eine Analyse der funktionellen und refraktiven Ergebnisse nach der Implantation intrakapsulärer oder sulkus-fixierter add-on torischer Intraokularlinsen (tIOL) bei moderatem bis hohem Astigmatismus nach Keratoplastik.

**Patienten und Methoden:** Es erfolgte eine retrospektive Analyse von Augen nach Keratoplastik, die einer intrakapsulären oder sulkusfixierten add-on-tIOL-Implantation unterzogen wurden. Die refraktiven Ergebnisse wurden mittels Vektoranalyse ausgewertet. Die Datenerhebung erfolgte präoperativ, einen Tag postoperativ sowie nach 6 Wochen und 10 Monaten.

**Ergebnisse:** Einhundertvierunddreißig Augen von 117 Patienten mit vorangehender PKP (n = 129; 96,3%) oder DALK (n = 5; 3,7%) wurden eingeschlossen. Intrakapsuläre tIOL wurden in phake (n = 115; 85,8%), add-on tIOL in pseudophake (n = 19; 14,2%) Augen implantiert. Die Datenerhebung umfasste 102 Augen (76%) nach 6 Wochen und 121 Augen (90%) nach 10 Monaten. Die mittlere tIOL-Zylinderstärke lag bei  $8,44 \pm 2,63$  Dioptrien (D) für die intrakapsulären und bei  $5,74 \pm 0,55$  D für die add-on-tIOL. Die mittlere unkorrigierte (UDVA) und bestkorrigierte Sehschärfe (BCVA in logMAR) verbesserten sich von präoperativ bis zum letzten Follow-Up bei den intrakapsulären tIOL von  $1,16 \pm 0,47$  auf  $0,51 \pm 0,38$  bzw. von  $0,55 \pm 0,31$  auf  $0,22 \pm 0,21$  ( $P < 0,001$ ). Nach add-on tIOL-Implantation verbesserten sich die mittlere UDVA und BCVA jeweils von  $1,10 \pm 0,29$  auf  $0,70 \pm 0,22$  bzw. von  $0,47 \pm 0,06$  auf  $0,37 \pm 0,07$  ( $P < 0,001$ ). Der mittlere refraktive Zylinder sank von  $-6,95 \pm 2,66$  auf  $-2,63 \pm 1,85$  D bei den intrakapsulären tIOL und von  $-8,00 \pm 2,71$  auf  $-4,2 \pm 1,97$  D bei den add-on-tIOL ( $P < 0,001$ ). Der mittlere Korrekturindex nach Vektoranalyse lag zum letzten postoperativen Follow-Up bei  $1,20 \pm 0,45$ , was auf eine Tendenz zur Überkorrektur hinweist.

**Schlussfolgerungen:** Die Implantation torischer Intraokularlinsen - intrakapsulär oder als add-on - ist vorhersehbar und effektiv bezüglich der Reduktion von moderatem bis sehr hohem, weitgehend regulärem Astigmatismus nach Keratoplastik bei gleichzeitig deutlicher Verbesserung der unkorrigierten und bestkorrigierten Sehschärfe.

## 2.2 Zusammenfassung – Englisch

**Purpose:** Residual astigmatism following penetrating keratoplasty (PKP) or deep anterior lamellar keratoplasty (DALK) is the predominant cause of postoperative vision loss and patient dissatisfaction in eyes with a clear corneal graft. The aim of this work was to analyze the functional and refractive outcomes after intracapsular or add-on toric intraocular lens (tIOL) implantation for moderate to high astigmatism after keratoplasty.

**Patients and Methods:** A retrospective analysis of eyes with previous keratoplasty which underwent intracapsular or add-on tIOL implantation was conducted. Refractive outcomes were assessed via vector analysis. Data collection was performed preoperatively, on postoperative day 1, after 6 weeks and after 10 months.

**Results:** One hundred and thirty-four eyes of 117 patients with previous penetrating ( $n = 129$ , 96.3%) or deep anterior lamellar keratoplasty ( $n = 5$ , 3.7%) were included. Intracapsular tIOL implantation was performed for phakic ( $n = 115$ , 85.8%), add-on tIOL implantation in the ciliary sulcus for pseudophakic eyes ( $n = 19$ , 14.2%). Data was obtained for 102 eyes (76%) at 6 weeks and for 121 eyes (90%) at 10 months. Mean IOL cylinder power was  $8.44 \pm 2.63$  Diopters (D) for intracapsular and  $5.74 \pm 0.55$  D for add-on IOL. Mean uncorrected (UDVA) and corrected distance visual acuity (CDVA in logMAR) in intracapsular tIOL significantly improved from  $1.16 \pm 0.47$  to  $0.51 \pm 0.38$  and from  $0.55 \pm 0.31$  to  $0.22 \pm 0.21$ , respectively ( $P < .001$ ). In add-on tIOL, mean UDVA and CDVA significantly improved from  $1.10 \pm 0.29$  to  $0.70 \pm 0.22$  and from  $0.47 \pm 0.06$  to  $0.37 \pm 0.07$ , respectively (both  $P < .001$ ). Mean refractive cylinder decreased from  $-6.95 \pm 2.66$  to  $-2.63 \pm 1.85$  D for intracapsular and from  $-8.00 \pm 2.71$  to  $-4.2 \pm 1.97$  D for add-on tIOL ( $P < .001$ ). Mean correction index in the vector analysis was  $1.20 \pm 0.45$  at last follow-up, indicating a tendency towards overcorrection.

**Conclusions:** Intracapsular and add-on tIOL implantation are predictable and effective in reducing moderate to very high, mostly regular post-keratoplasty astigmatism while concomitantly improving uncorrected and corrected visual acuity.

## 3 Einleitung

### 3.1 Der dioptrische Apparat

#### 3.1.1 Anatomische und physikalische Grundlagen

Der Begriff dioptrischer Apparat bezeichnet sämtliche Strukturen des menschlichen Auges, die eine Brechung einfallenden Lichts bewirken. Diese sind in Reihenfolge des Lichteinfalls von außen in das Auge: die Cornea (Hornhaut), der humor aquosus (Kammerwasser), die lens oculi (Augenlinse) und das corpus vitreum (Glaskörper). Sämtliche Strukturen des dioptrischen Apparats sind transparent. Die Brechkraft der jeweiligen Struktur lässt sich mittels der Formel für die Brechkraft einer optischen Fläche berechnen:

$$D = n - 1/r$$

Die Brechkraft eines optischen Linsensystems wird dabei international in Dioptrien (D) angegeben und hängt laut Brechungsgesetz nach Snellius aus dem Jahr 1620 von dem jeweils durchquerten optisch wirksamen Medium ab. Der Krümmungsradius der brechenden Fläche wird hierbei als  $r$  bezeichnet. Für jedes Medium des dioptrischen Apparats besteht ein eigener Brechungsindex ( $n$ ). Der Brechungsindex eines Mediums ( $n_{\text{medium}}$ ) lässt sich durch die folgende Formel berechnen:

$$n_{\text{medium}} = \frac{\text{Lichtgeschwindigkeit im Vakuum}}{\text{Lichtgeschwindigkeit im Medium}}$$

Die Brechungsindizes des menschlichen Auges können wie in der folgenden Tabelle beschrieben werden (Tab. 1):

Struktur	Brechungsindex $n$
Kornea	1,376
Kammerwasser	1,336
Linse im Bereich der Pole	1,385
Linse im Bereich des Kerns	1,406
Glaskörper	1,336

**Tabelle 1:** Brechungsindizes der lichtbrechenden Medien des menschlichen Auges (mod. nach (KRAUSE, 1989)).

Der Brechungsindex von Luft liegt unter Normalbedingungen bei 1,0003. Die Brechzahl eines Mediums wird im Gegensatz zum Brechungsindex in Bezug zur Lichtgeschwindigkeit in Luft statt im Vakuum angegeben, da diese unter Normalbedingungen exakt 1 beträgt.

Die stärkste brechende Fläche im dioptrischen Apparat ist die Kornea mit durchschnittlich 43 D. Sie macht damit etwa  $\frac{2}{3}$  der Gesamtbrechkraft (ca. 62 D) des normalsichtigen Auges aus. Die Brechkraft der Augenlinse beträgt im Mittel je nach Akkommodationszustand 10-20 D. Die Akkommodation bezeichnet die Fähigkeit des Auges, die Augenlinse zur Scharfstellung näherer bzw. weiter entfernter Objekte stärker zu krümmen bzw. abzuflachen. Die Akkommodation wird durch ein Zusammenspiel von Eigenelastizität der Linse, Zonulafasern und Ziliarkörper ermöglicht. Die größtenteils aus Fibrillin und Kollagen Typ IV bestehenden Zonulafasern verbinden die Augenlinse radiär zirkumferentiell mit dem Ziliarkörper. Der Ziliarkörper (= Ringmuskel) bewirkt durch seine Kontraktion eine Entspannung der Zonulafasern, ermöglicht so eine Zunahme der Linsenkrümmung und damit eine Brechkrafterhöhung. So können nah gelegene Objekte scharf gesehen werden. Demgegenüber kommt es bei Entspannung des Ziliarmuskels durch verstärkten Zug der Zonulafasern zum Abflachen der Linse, die Brechkraft nimmt folglich ab und weiter entfernte Objekte werden scharf gestellt.

### 3.1.2 Ametropien

Man unterscheidet in Bezug auf das Verhältnis von Achsenlänge des Auges und Brechkraft von Hornhaut und Linse zwischen emmetropen (= normalsichtigen) und ametropen (= fehlsichtigen) Augen. Bei der Emmetropie ist dieses Verhältnis ausgeglichen, d.h. parallel ins Auge einfallende Lichtstrahlen werden im Brennpunkt auf der Netzhaut gebündelt. Bei der Ametropie besteht ein Missverhältnis zwischen Achsenlänge und Hornhaut- bzw. Linsenbrechkraft. Hierbei wird zwischen Achsenametropie (Bulbuslänge zu groß/klein) und Brechungsametropie (Hornhaut-/Linsenbrechkraft zu hoch/niedrig) differenziert. Bei der Myopie (= Kurzsichtigkeit) ist der Bulbus zu lang und/oder die Brechkraft der Medien zu hoch, der Brennpunkt parallel einfallender Strahlen rückt vor die Netzhaut. Betroffene sehen ohne entsprechende Korrektur näher gelegene Objekte scharf, in der Distanz allerdings verschwommen. Bei der Hyperopie (= Weitsichtigkeit) ist der Bulbus zu kurz und/oder die Brechkraft der Medien zu niedrig, der Brennpunkt parallel einfallender Strahlen rückt hinter

die Netzhaut. Betroffene sehen ohne Korrektur in der Distanz scharf, jedoch näher gelegene Objekte unscharf. Den altersbedingten Verlust der Akkommodationsfähigkeit durch die Einlagerung unlöslicher Proteine in die Linse bezeichnet man als Presbyopie (= Alterssichtigkeit). Der Prozess der Presbyopie beginnt meist zwischen dem 40. und 45. Lebensjahr und verursacht eine kontinuierliche Verringerung der sogenannten Akkommodationsbreite (GLASSER, CAMPBELL, 1998). Die Akkommodationsbreite beschreibt die Differenz zwischen der maximalen (naheinstellbaren) und minimalen (ferneinstellbaren) Brechkraft des Auges und wird in D angegeben. Der nächste Punkt, den das Auge durch maximale Akkommodation scharf darstellen kann, wird als punctum proximum (= Nahpunkt) bezeichnet, der fernste Punkt, der ohne Akkommodation scharf gesehen werden kann als punctum remotum (= Fernpunkt). Im Durchschnitt besitzt das Auge eines emmetropen 10-Jährigen eine Akkommodationsbreite von 10-15 D, das Auge eines 45-Jährigen eine Akkommodationsbreite von 2,5 D (DUANE, 1912).

## 3.2 Astigmatismus

### 3.2.1 Allgemein

Der Astigmatismus (= Stabsichtigkeit, von gr.  $\alpha$  = nicht,  $\sigma\acute{\iota}\gamma\mu\alpha$  = Punkt) ist eine der häufigsten Refraktionsanomalien des menschlichen Auges. Neben der Myopie, Hyperopie und Presbyopie macht ein Astigmatismus mit refraktivem Zylinder von  $\geq 0,5$  D weltweit circa 15 % der refraktiven Fehler bei Kindern und circa 40 % bei Erwachsenen aus (HASHEMI et al., 2018). Beim Astigmatismus sind die brechenden Medien des Auges nicht sphärisch (= kugelförmig), d.h. parallel einfallende Lichtstrahlen werden nicht in einem Brennpunkt, sondern auf einer Brennlinie gebündelt. Es besteht für den gesamten dioptrischen Apparat eine Brennpunktlosigkeit, der Betroffene sieht entsprechend in allen Distanzen unscharf.

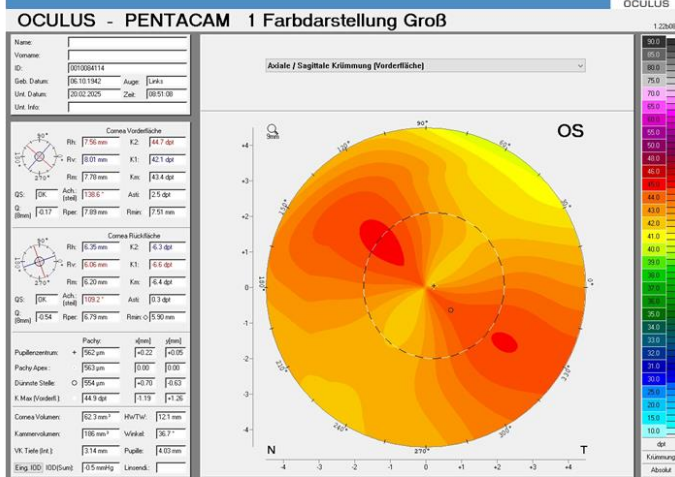
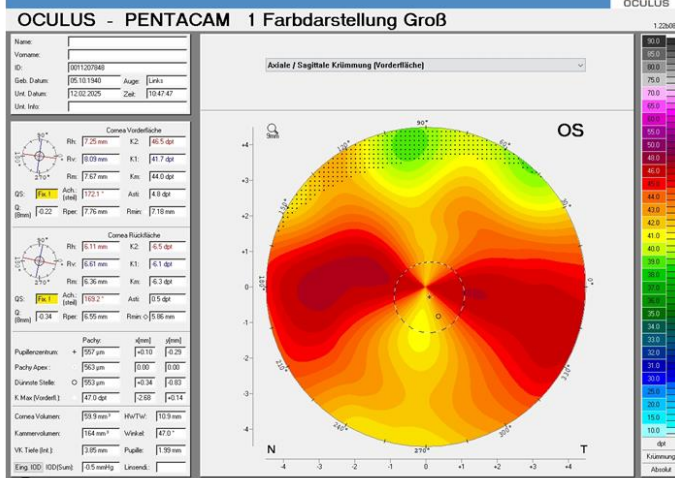
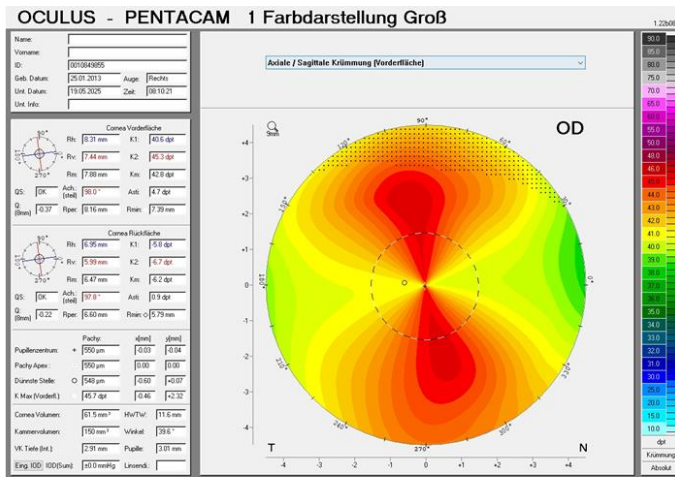
Der Astigmatismus als Krankheitsentität wurde in der Literatur erstmals im Jahr 1800 von dem Briten Thomas Young beschrieben (ATCHISON, CHARMAN, 2010). Young war aufgefallen, dass manche Fehlsichtige mit geneigt vorgehaltenen sphärischen Linsen schärfer sehen konnten. Er machte sich dabei unbewusst den „Astigmatismus schiefer Bündel“ zunutze. Eine

Erkrankungsdefinition sowie die ersten Korrekturversuche wurden anschließend von dem Briten Sir George Biddell Airy publiziert (LEVENE, 1966).

Der totale okuläre Astigmatismus setzt sich aus einem kornealen und einem internen Anteil zusammen. Der korneale Astigmatismus entsteht durch eine unregelmäßige Krümmung der Hornhautvorder- und/oder -rückfläche (READ et al., 2007). Die Differenz der Brechungsindizes zwischen Luft und anteriorer Hornhaut ist wesentlich größer als die zwischen posteriorer Hornhaut und Kammerwasser. Dementsprechend ist die Brechkraft der Hornhautvorderfläche höher als die der Rückfläche. Der interne Astigmatismus setzt sich aus der Verkrümmung der Vorder- und Rückfläche der kristallinen Linse und ihrer Verkipfung bzw. Dezentrierung zusammen (READ et al., 2007).

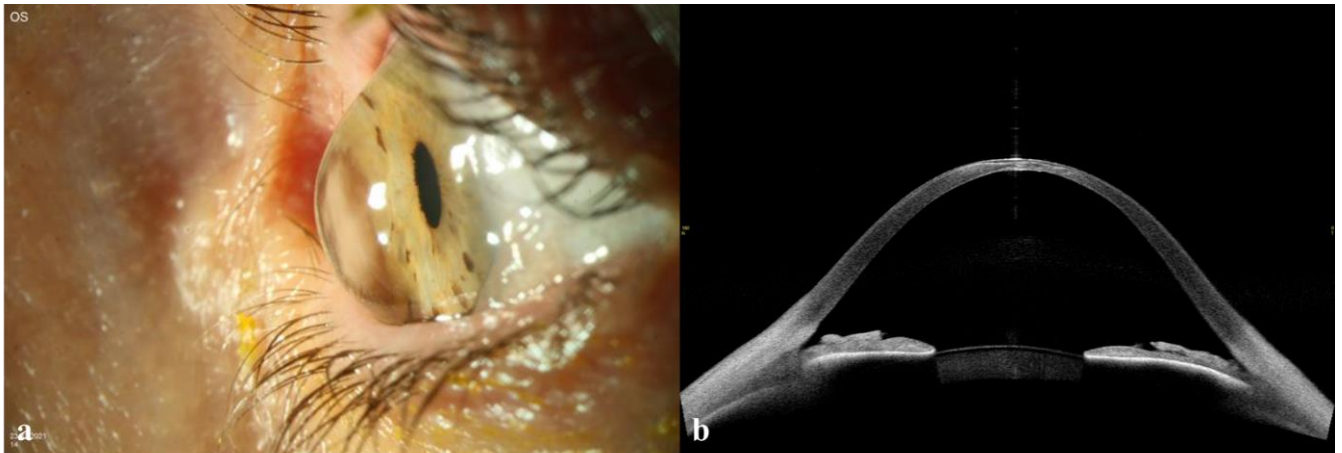
### 3.2.2 Regulärer Astigmatismus

Beim kornealen Astigmatismus wird zwischen einer regulären und einer irregulären Form unterschieden. Die Hauptkrümmungsmeridiane stehen beim regulären kornealen Astigmatismus nahezu senkrecht aufeinander. Der reguläre korneale Astigmatismus kann in Astigmatismus rectus (= mit der Regel, „with-the-rule“, WTR), inversus (= gegen die Regel, „against-the-rule“, ATR) und obliquus (= schräg, „oblique“, OBL) unterteilt werden (READ et al., 2007). Beim WTR-Astigmatismus verläuft der steilste Meridian entlang einer nahezu vertikalen Achse (zwischen 70 und 110°), beim ATR-Astigmatismus entlang einer nahezu horizontalen Achse (zwischen 160 und 20°) und beim OBL-Astigmatismus nahezu diagonal (zwischen 20 und 70° oder zwischen 110 und 160°, Abb. 1) (READ et al., 2007).



**Abbildung 1:** Scheimpflugtomographie von 3 Augen mit regulärem kornealem Astigmatismus mit der Regel (a), gegen die Regel (b) und mit obliquem Astigmatismus (c) in sogenannter „Fliegen“-Konfiguration („bowtie astigmatism“). Der steile Krümmungsmeridian liegt hier jeweils bei 98° (a), 172° (b) und 138° (c).





**Abbildung 3:** Seitliche Photographie (a) und optische Kohärenztomographie des vorderen Augenabschnittes (b) eines Auges mit Keratoglobus. Die globale konische Vorwölbung und Ausdünnung der Hornhaut sind pathognomonisch.

Ein isolierter irregulärer Astigmatismus der Hornhaurückfläche kann im Falle des seltenen KK posticus circumscriptus auftreten (SILAS et al., 2018). Die große Gruppe der kornealen Dystrophien kann ebenfalls einen irregulären Astigmatismus induzieren. Insbesondere die Fuchs-Hornhaut-Endotheldystrophie neigt zur Ausbildung kornealer Irregularitäten (OIE et al., 2021).

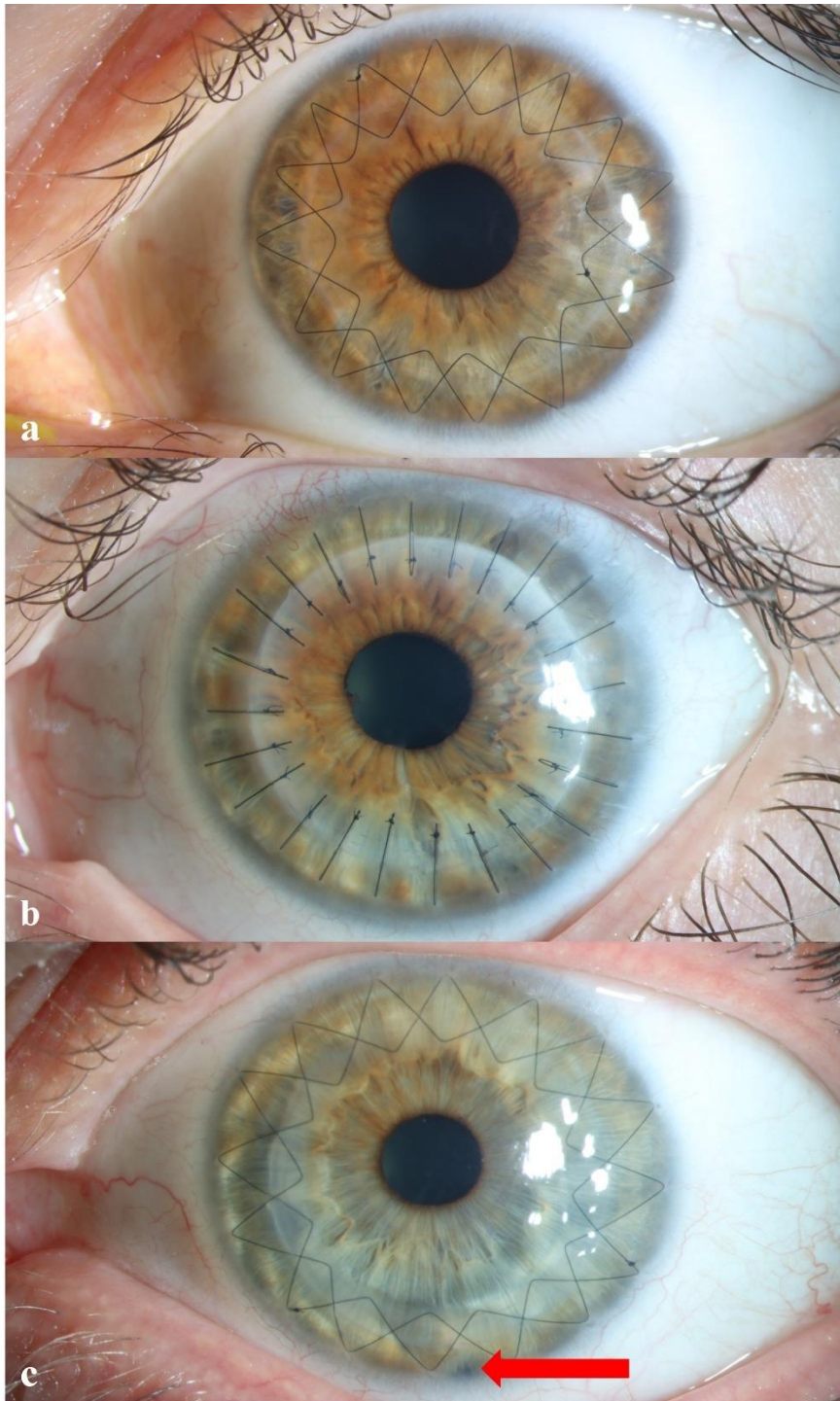
Sekundär kann ein irregulärer Astigmatismus posttraumatischer (durch Narbenbildung nach Hornhautverletzung), postinfektiöser (z.B. durch herpetische Keratitis) oder iatrogener (nach Hornhautchirurgie wie LASIK, PRK, Hornhauttransplantation) Genese sein (JAIN et al., 2002; OIE et al., 2021; SUZUKI et al., 2007; TANABE et al., 2004). In diesem Zusammenhang ist als eigenständiges Krankheitsbild auch die iatrogene Keratektasie nach LASIK zu nennen. Bei dieser seltenen Erkrankung kommt es nach refraktiv-chirurgischem Eingriff zu einer progressiven Keratektasie der Hornhaut, die in ihrer Pathophysiologie dem KK ähnelt (SEILER et al., 1998). Okuläre Manifestationen von Erkrankungen aus dem rheumatischen Formenkreis können ebenfalls zur Entstehung eines irregulären Astigmatismus führen. Die Fuchs-Terrien marginale Degeneration, die peripher-ulzerative Keratitis (PUK) und das Ulkus Mooren können durch degenerative Prozesse wie die sklerale Verdünnung die Entstehung eines irregulären Astigmatismus bedingen (EKONG, 1996; HASSANPOUR et al., 2022). Im seltenen Fall des Lentikonus (= konische Vorwölbung der Linsenkapsel) kann ein irregulärer Astigmatismus lentogen sein (KAUR, GURNANI, 2025).

### 3.3 Keratoplastik

#### 3.3.1 Allgemein

Die perforierende Keratoplastik (PKP) bezeichnet die durchgreifende Exzision einer erkrankten Hornhautscheibe in einem definierten Durchmesser und anschließende Implantation einer gesunden Hornhautscheibe eines verstorbenen menschlichen Spenders (Abb. 4). Hierbei wird die Hornhaut mitsamt aller ihrer Schichten, sprich Epithel, Bowman-Lamelle, Stroma, Descemet-Membran und Endothel transplantiert. Die weltweit erste solide Organtransplantation durch Eduard Zirm im Jahre 1905 war eine PKP (ZIRM, 1906). Seither hat sich das Verständnis der immunologischen Eigenschaften der Hornhaut, der Operationstechniken, der verfügbaren Technologie sowie der perioperativen Behandlung wesentlich verbessert. In Deutschland wurden in den Jahren 2011 bis 2021 etwa 3000 PKPs pro Jahr durchgeführt (FLOCKERZI et al., 2024). Mit 386 perforierenden Keratoplastiken im Jahr 2021 lag die Klinik für Augenheilkunde des Universitätsklinikums Homburg/Saar laut Deutschem Keratoplastikregister damit auf Platz 1.

Die Hauptindikationen für eine Keratoplastik sind deutschlandweit in absteigender Reihenfolge: Die Fuchs-Hornhautendothel-Dystrophie, die pseudophake bullöse Keratopathie, die Re-Keratoplastik, Infektionen der Hornhaut, der KK und korneale Vernarbungen (FLOCKERZI et al., 2024). In den letzten 28 Jahren hat die tiefe anteriore lamelläre Keratoplastik („deep anterior lamellar keratoplasty“, DALK) zunehmend an klinischer Bedeutung gewonnen. Bei der DALK erfolgt die Transplantation einer kornealen Spenderscheibe ohne das Endothel nach vorheriger Entfernung des pathologischen Wirtsstromas bis herunter zur Descemet-Membran (ANWAR, TEICHMANN, 2002; SUGITA, KONDO, 1997). Die DALK bringt bei Patienten mit gesundem Endothel den Vorteil eines niedrigeren Abstoßungsrisikos des Fremdgewebes mit sich (ARUNDHATI et al., 2021; ROMANO et al., 2015).



**Abbildung 4:** Spaltlampenphotographien von 3 Augen nach perforierender Keratoplastik mit doppelt-fortlaufender Kreuzstichnaht nach Hoffmann (a), nach perforierender Keratoplastik mit Einzelknüpfnähten (b) sowie nach tiefer anteriorer lamellärer Keratoplastik (DALK) (c). Zur Prävention einer postoperativen Luftblocksituation erfolgt vor der DALK eine periphere Iridotomie bei 6 Uhr mit dem Nd:YAG-Laser (c, roter Pfeil).

### 3.3.2 Astigmatismus nach Keratoplastik

Die Hornhaut hat den größten Anteil an Brechkraft im dioptrischen Apparat. Die Hornhautchirurgie, insbesondere die Hornhauttransplantation mit Fadeneinbringung kann daher eine vehemente Veränderung dieser Brechkraft mit sich bringen. Ein häufiges Problem nach PKP oder DALK ist ein hoher residueller kornealer Astigmatismus trotz klarem Transplantat. Etwa ein Drittel der Patienten nach perforierender Keratoplastik entwickeln einen kornealen Astigmatismus von  $\geq 5$  D nach vollständiger Fadenentfernung (CLAESSON, ARMITAGE, 2009; DESHMUKH et al., 2022). Der Astigmatismus nach DALK ist mit dem nach perforierender Keratoplastik vergleichbar (KEANE et al., 2014; REINHART et al., 2011). Die betroffenen Patienten zeigen eine unzufriedenstellende Sehleistung und sind in ihrer Lebensqualität erheblich eingeschränkt. Der Astigmatismus nach PKP oder DALK ist oft hoch und/oder irregulär und wird in seiner Entstehung durch verschiedenste Faktoren beeinflusst. Diese können in präoperative, intraoperative und postoperative Faktoren unterteilt werden.

**Präoperativ:** Der Transplantatdurchmesser des Spenders spielt eine wesentliche Rolle bei der Entstehung eines Astigmatismus. Ein kleinerer Transplantatdurchmesser führt in der Regel zu größerer topographischer Irregularität nach PKP (SEITZ et al., 2003). Exzessive Über- oder Unterdimensionierung des gewählten Spenderdurchmessers sollte vermieden und die Spendergröße stets an die individuelle Hornhautgröße des Patienten angepasst werden (SEITZ et al., 2005). Eine korneale Spendertomographie zum Ausschluss einer latenten Keratektasie oder eines relevanten Astigmatismus sollte präoperativ stets durchgeführt werden (SEITZ et al., 2005). Das Alter des Hornhautspenders spielt ebenfalls eine Rolle. So führt das Gewebe eines pädiatrischen Spenders (0 bis 5 Jahre) bei erwachsenen Empfängern postoperativ zu stärkerer kornealer Krümmung als das eines älteren Spenders (40 bis 70 Jahre) (PALAY et al., 1997).

**Intraoperativ:** Ein wichtiger intraoperativer Faktor ist die Trepanationstechnik für Spender und Empfänger. Die Gewebetrepanation ist mittels Handtrepan, Barron-Trepan, geführtem Trepansystem (GTS), Femtosekundenlaser-assistiert oder Excimerlaser-assistiert möglich. Bei der Spendertrepanation ist auf eine exakte Zentrierung bei der Trepanführung zu achten, um eine asymmetrische Spender-Empfänger-Konfiguration und dadurch bedingte vertikale Verkipfung zu vermeiden (LANGENBUCHER et al., 1998; SEITZ et al., 2005). Bei konventioneller mechanischer Trepanation ist außerdem die Richtung der Trepanführung entscheidend (von endothelial versus von epithelial). Von endothelial gestanztes

Spendergewebe ist eher kleiner, von epithelial gestanztes Gewebe eher größer als der jeweilig gewählte Trepandurchmesser (VAN RIJ, WARING, 1988). Die Excimerlaser-assistierte Trepanation von Spender und Empfänger ermöglicht saubere Schnittkanten, symmetrische Wundverhältnisse und bessere Zentrierung und ist der konventionell-mechanischen Trepanation überlegen (LANGENBUCHER et al., 1998). Eine limbusorientierte Zentrierung der Trepanation ist der pupillenorientierten Zentrierung bei entrundeter Pupille oder Vorliegen einer ektatischen Hornhauterkrankung durch den verfälschten Lichtreflex der Hornhaut vorzuziehen (LANGENBUCHER et al., 1998; WALSH, CHARMAN, 1988). Nahttechnik und Fadenspannung spielen ebenfalls eine wichtige Rolle. Die doppelt fortlaufende Kreuzstichnaht nach Hoffmann verbessert die postoperative Visusrehabilitation und topographische Regularität (HOFFMANN, 1978). Diese ist bei intakter Bowman-Lamelle und ausreichender peripherer Hornhautdicke des Empfängers der Befestigung mit Einzelknüpfnähten vorzuziehen (BUSIN et al., 1998; FROST et al., 2006; JAVADI et al., 2006). Je kongruenter die Trepanation des Spenders und Empfängers erfolgt ist, desto geringer ist die zur Stabilisierung notwendige Fadenspannung und dadurch auch der postoperative Astigmatismus. Die intraoperative Positionierung der zweiten Situationsnaht spielt dabei eine wesentliche Rolle zur Vermeidung einer horizontalen Torsion des Spendergewebes im Empfängerbett (NAUMANN, 1995).

**Postoperativ:** Postoperative Komplikationen wie Fadenlockerung, Infektion oder Abstoßungsreaktion können einen hohen irregulären Astigmatismus induzieren (HOPPENREIJS et al., 1993). Von oberster Wichtigkeit sind daher in der Nachsorge eine adäquate systemische und lokale medikamentöse Therapie sowie regelmäßige Verlaufskontrollen. Gelockerte Hornhautfäden müssen konsequent entfernt werden. Hereditäre Hornhautdystrophien können auf dem Transplantat rezidivieren, was wiederum einen bestehenden Astigmatismus erhöhen kann (MARCON et al., 2003). Insbesondere der KK scheint nach PKP langfristig für eine refraktive Instabilität zu prädisponieren (DE TOLEDO et al., 2003).

## 3.4 Intraokularlinsen

### 3.4.1 Historie der Linsenoperation

Die älteste bekannte Linsenoperation beim Menschen ist der sogenannte Starstich. Hierbei wurde die körpereigene trübe Linse mittels einer Starnadel aus der optischen Achse in den Glaskörperraum, nicht jedoch aus dem Auge heraus luxiert. Der Starstich wurde bereits im fünften Jahrhundert vor Christus in der Literatur beschrieben (LEFFLER et al., 2020). Nach früh postoperativer Verbesserung der Sehschärfe hatte der Starstich jedoch fatale Konsequenzen durch die im Auge verbleibende Katarakt und führte auch wegen fehlender Antiseptik nach kurzer Zeit meist zur Erblindung des Behandelten.

Erst im Laufe des 18. Jahrhunderts gewann die extrakapsuläre Kataraktextraktion (ECCE) zunehmend an Bedeutung. Bei diesem Verfahren wurde die Linsenkapsel mit einer Nadel punktiert und der Nucleus (= Linsenkern) über einen großen kornealen Zugangsschnitt (> 10 mm) manuell exprimiert. Kortexreste (= Linsenrindenreste) wurden anschließend mittels Kürettage über denselben Schnitt entfernt. Trotz größerer Erfolgsrate war auch die ECCE mit schweren Komplikationen wie Wundheilungsstörungen und Infektionen verbunden (LEFFLER et al., 2020).

Im 19. Jahrhundert löste die intrakapsuläre Kataraktextraktion (ICCE) die ECCE als bevorzugte Behandlungsmethode temporär ab. Bei der ICCE wurde die körpereigene Linse mitsamt der Linsenkapsel über einen kornealen Zugangsschnitt entfernt. Durch das Fehlen der Linsenkapsel – der natürlichen Barriere zwischen hinteren und vorderen Strukturen innerhalb des Auges – kam es jedoch postoperativ häufig zu einem Prolaps (= Vorfall) des Glaskörpers, Netzhautablösung und Makulaödem. Die ECCE blieb deshalb bis in die 1970er Jahre die präferierte Behandlungsmethode der Katarakt.

Seit der revolutionären Einführung der Phakoemulsifikation der körpereigenen Linse durch den Amerikaner Charles Kelman im Jahre 1967 hat sich diese Methode über die vergangenen Jahrzehnte bis heute zum Goldstandard in der Behandlung der Katarakt entwickelt (KELMAN, 1967). Hierbei wird die körpereigene Linse über eine kleine Inzision (2-4 mm) mittels einer Multifunktions-Ultraschall-Sonde zertrümmert und abgesaugt. Vorteile der Phakoemulsifikation sind die geringere Infektionsrate, die verkürzte postoperative visuelle Rehabilitationsphase und der geringere induzierte Astigmatismus.

Ein weiterer wissenschaftlicher Meilenstein war die erste Implantation einer künstlichen IOL durch den Briten Sir Harold Ridley im Jahre 1949 (APPLE, SIMS, 1996; WILLIAMS, 2001). Zuvor blieben Patienten nach den beschriebenen Operationsmethoden aphak (= linsenlos) und benötigten postoperativ eine stark hyperope Brillenkorrektur, die sog. Starbrille. Da die IOL-Implantation in ihren frühen Jahren meist nach einer ICCE durchgeführt wurde, musste die Kunstlinse in der Vorderkammer des Auges kammerwinkelgestützt positioniert oder an der Vorderfläche der Iris fixiert werden. Dies führte durch die schlotternde Kunstlinse in vielen Fällen zu einer Schädigung des Hornhautendothels, intraokulärem Druckanstieg, Pupillentrübung und Uveitis-Glaukom-Hyphäma-Syndrom (DAVIS, 2016). Nach der Entwicklung der ersten designierten Hinterkammer-IOL – platziert im Sulcus ciliaris – durch den Amerikaner Steven Shearing in den 1970er Jahren verbesserten sich die Erfolgsraten wesentlich (KRATZ et al., 1981).

### 3.4.2 Historie der torischen IOL

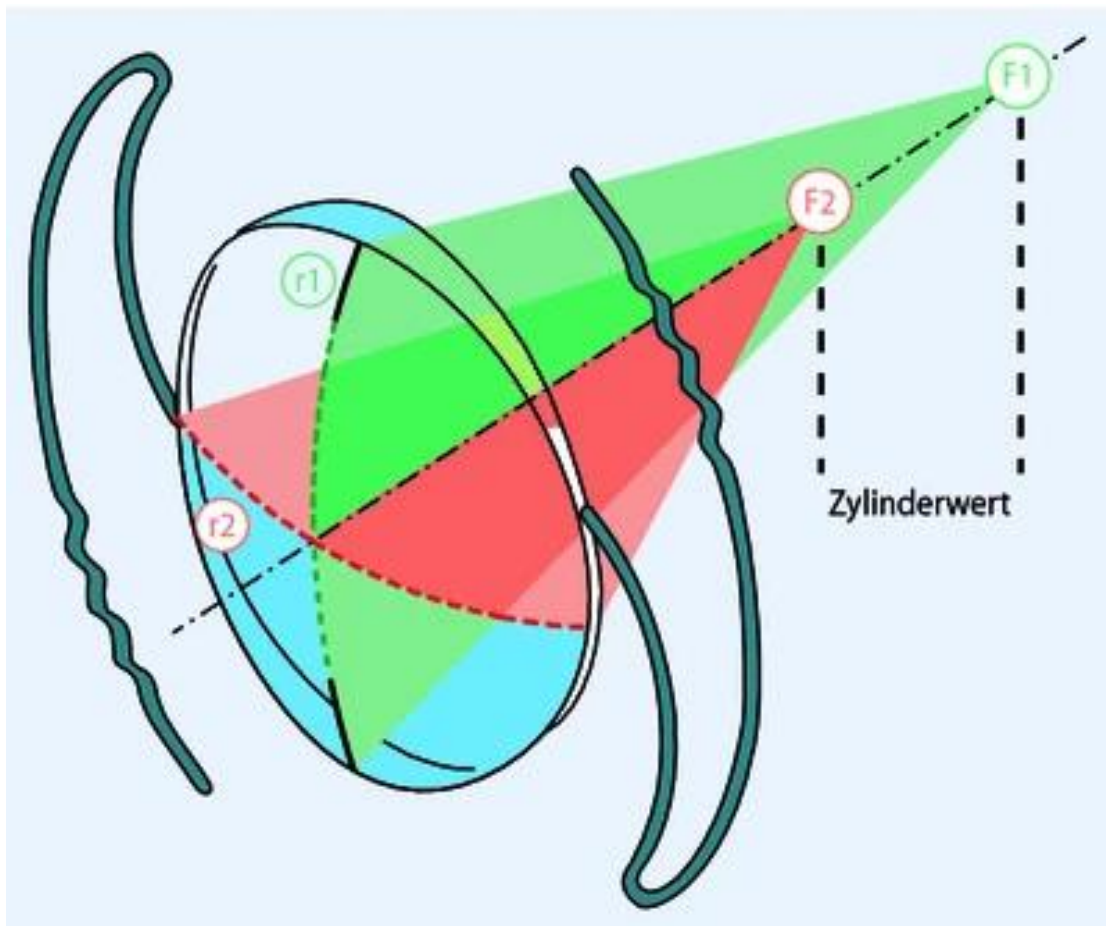
Die erste Implantation einer torischen Intraokularlinse (IOL) im Rahmen einer Kataraktoperation zum Ausgleich eines kornealen Astigmatismus erfolgte im Jahr 1992 durch den Japaner Kimiya Shimizu (SHIMIZU et al., 1994). Das implantierte Modell bestand aus einem starren, dreiteiligen Polymethylmethacrylat (PMMA) mit offener Schleifenhaptik („Open-Loop“-Haptik) und ermöglichte eine Zylinderkorrektur von 2,0 und 3,0 D, respektive. Für die Implantation war eine Inzisionsgröße von 5,7 mm notwendig. Die erste einteilige, faltbare torische IOL mit Platten-Haptik erschien im Jahr 1994, war gefertigt aus Silikon und konnte über eine Inzision von 3,2 mm bereits wesentlich einfacher implantiert werden (RUHSWURM et al., 2000). Diese ermöglichte eine Zylinderkorrektur von 2,0 bis 4,0 D. Eine signifikante postoperative Verbesserung der Sehschärfe zeigte sich bereits zu diesem Zeitpunkt bei einem Großteil der behandelten Patienten (RUHSWURM et al., 2000; SHIMIZU et al., 1994; SUN et al., 2000).

Eine häufige Komplikation in den ersten Jahren der torischen IOL-Implantation war die postoperative Rotationsinstabilität der IOL. Fast ein Viertel der Patienten wies eine postoperative Achsenrotation von circa 30° auf (PATEL et al., 1999). Dabei ist zu berücksichtigen, dass bereits eine Achsenrotation von 15° den antiastigmatischen Effekt der torischen IOL um etwa 50% reduziert und das funktionelle Endergebnis somit deutlich verschlechtert (LANGENBUCHER et al., 2010). In den darauffolgenden Jahren bis heute

wurde die Herstellung, die Technologie und das Design der zu implantierenden torischen IOL sowie die verfügbaren Operationsmethoden für den Chirurgen wesentlich verbessert. Seither zeigt sich ein stetiger Trend zu besserem visuellem Ergebnis, effektiverer Astigmatismuskorrektur und größerer postoperativer Rotationsstabilität (MIYAKE et al., 2014).

### 3.4.3 Funktionsweise der torischen IOL

Die vollständige Korrektur eines refraktiven Fehlers erfordert neben dem Ausgleich des sphärischen Brechfehlers auch den des (kornealen) Astigmatismus. Diese Korrektur ist bei weitgehend regulärem Astigmatismus mittels torischer IOL möglich. Der Begriff „Torus“ stammt aus der Geometrie und bezeichnet eine rotationssymmetrische Körperform, die einem Donut ähnelt. In der optischen Physik bezeichnet der Torus eine spezielle Brechkraftverteilung. Die torische IOL zeichnet sich durch zwei senkrecht aufeinander stehende Hauptmeridiane aus, wobei einer der Meridiane stärker, der andere schwächer gekrümmt ist. Die Zylinderstärke der torischen IOL ist definiert als die Differenz der Kehrwerte beider Brennpunkte (Abb. 5).



**Abbildung 5:** Schematische Darstellung der Funktionsweise einer torischen IOL. Dabei bezeichnet r1 den flachen und r2 den steilen Krümmungsmeridian. F1 und F2 bezeichnen jeweils die Brennpunkte beider Meridiane (VIESTENZ et al., 2007).

Chirurgische Eingriffe an oder neben der Hornhaut verändern den kornealen Astigmatismus (PFLEGER et al., 1996; SWINGER, 1987). Eine zwingende Voraussetzung für die Implantation einer torischen IOL ist daher die präzise Vorhersagbarkeit des chirurgisch induzierten kornealen Astigmatismus (= „surgically induced corneal astigmatism“, SICA). Der SICA ist bei moderner Mikroinzisions-Kataraktchirurgie reproduzierbar so niedrig, dass er keine wesentliche Auswirkung auf den postoperativen refraktiv gemessenen Astigmatismus hat (KAUFMANN et al., 2009). Der SICA ist im Idealfall null, die Inzision dementsprechend „astigmatismusneutral“.

Neben der Zylinderstärke der torischen IOL spielt ihre Achsausrichtung eine entscheidende Rolle. Kobashi et al. zeigten, dass die unkorrigierte Sehschärfe unabhängig von Höhe und Art des Astigmatismus signifikant von der Orientierung der Achse beeinflusst wird (KOBASHI et al., 2012).

Aktuell stehen multiple torische IOL-Modelle auf dem Markt zur Verfügung (THULASIDAS, KADAM, 2024). Diese bestehen aus hydrophobem Acryl, hydrophilem Acryl, Silikon, PMMA oder Kombinationen der zuvor genannten (THULASIDAS, KADAM, 2024; VISSER et al., 2013). Die Standardmodelle sind in einer Zylinderstärke von 1,0 bis 12,0 D (0,67 bis 8,0 D auf kornealer Ebene), in der Regel in Schritten von 0,5 bis 0,75 D verfügbar. Speziell angefertigte torische IOL sind in noch größeren Zylinderstärken verfügbar (LUCK, 2010). Für Patienten mit Anspruch auf vollständige postoperative Brillenfreiheit besteht zudem die Möglichkeit der Implantation einer multifokalen torischen IOL (= IOL mit mehr als einem Brennpunkt). Diese sind auch bei geringem refraktiven Zylinder ( $\geq 0,75$  D) erfolgreich einsetzbar und ermöglichen im Idealfall eine weitgehende Brillenfreiheit in Nah-, Mittel- und Ferndistanz (HAYASHI et al., 2000). Die Größe der torischen IOL reicht im Durchmesser von 7,5 bis 13,0 mm.

Über die Vor- und Nachteile der unterschiedlichen Materialien und Eigenschaften der verfügbaren torischen IOL herrscht in der Literatur Uneinigkeit. Nach Implantation einer torischen IOL in den Kapselsack verkleben die vordere und hintere Linsenkapsel mit der Kunstlinse, was eine Rotation verhindert und eine stabile Achslage gewährleistet. Je stärker diese Adhäsion ist - so die Annahme - desto stabiler sitzt die Kunstlinse und desto unwahrscheinlicher ist eine postoperativ relevante Rotation. Es wird vermutet, dass extrazelluläre Matrix-Proteine wie Fibronectin, Vitronectin und Kollagen Typ IV eine entscheidende Rolle bei der Adhäsionsbildung zwischen Kapselsack und Kunstlinse spielen (LINNOLA et al., 1999). Eine Studie aus Wien zeigte eine größere postoperative Rotationsstabilität bei hydrophobem (= wasserabweisendem) Biomaterial der torischen IOL im Vergleich zu einem identischen Design aus hydrophilem (= wasseranziehendem) Material (DRASCHL et al., 2017). Demgegenüber fand eine aktuelle Studie aus Indien keinen signifikanten Unterschied in Bezug auf Ausrichtungsfehler oder Repositionsraten zwischen hydrophoben und hydrophilen IOL aus Acryl (HARIPRIYA et al., 2021). Auch in Bezug auf das ideale Design der Haptiken (Plattenhaptik vs. Open-Loop-Haptik) besteht international bisher kein Konsens (MIHALTZ et al., 2018; PATEL et al., 1999; SCIALDONE et al., 2013).

Die folgende Tabelle gibt einen Überblick aktuell verfügbarer monofokaler torischer IOL (Tab. 2):

<b>Name des IOL-Modells</b>	<b>Material und Größe</b>	<b>Eigenschaften und Stärkebereich</b>
AcrySof toric (Alcon Laboratories Inc., Fort Worth, USA)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Hydrophobes Acryl</li> <li>13,0 mm Durchmesser</li> <li>6,0 mm Optik-Durchmesser</li> <li>Flexible Loop-Haptik</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Asphärisch</li> <li>SP: 6,0 - 34,0 D</li> <li>ZP: 1,50 - 6,0 D (0,75 D Schritte)</li> </ul>
Precizon toric (Ophtec BV, Groningen, Niederlande)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Hydrophiles Acryl</li> <li>12,5 mm Durchmesser</li> <li>6,0 mm Optik-Durchmesser</li> <li>Modifizierte C-Haptik</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Asphärisch</li> <li>SP: 1,0 - 34,0 D</li> <li>ZP: 1,0 - 10,0 D (0,5 D Schritte)</li> </ul>
Tecnis toric (Johnson and Johnson, New Brunswick, USA)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Hydrophobes Acryl</li> <li>13,0 mm Durchmesser</li> <li>6,0 mm Optik-Durchmesser</li> <li>3-Punkt-Fixierung, scharfe Haptikkante</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Asphärisch</li> <li>SP: 5,0 - 34,0 D</li> <li>ZP: 1,5 - 6,0 D (0,5 D Schritte)</li> </ul>
AT Torbi (Carl Zeiss Meditec AG, Oberkochen, Deutschland)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Hydrophobes Acryl</li> <li>11,0 mm Durchmesser</li> <li>6,0 mm Optik-Durchmesser</li> <li>Plattenhaptik</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Asphärisch</li> <li>SP: -10,0 - +32,0 D</li> <li>ZP: 1,0 - 12,0 D (0,5 D Schritte)</li> </ul>
Tiflex (Rayner, Worthing, Vereinigtes Königreich)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Hydrophiles Acryl</li> <li>12,0/12,5 mm Durchmesser</li> <li>6,0 mm Optik-Durchmesser</li> <li>Anti-Vaulting-Haptik</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Asphärisch</li> <li>SP: -10,0 - +35,0 D</li> <li>ZP: 1,0 - 11,0 D (0,25 D Schritte)</li> </ul>
RayOne Toric (Rayner, Worthing, Vereinigtes Königreich)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Hydrophiles Acryl</li> <li>12,5 mm Durchmesser</li> <li>6,0 mm Optik-Durchmesser</li> <li>Anti-Vaulting-Haptik</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Posterior asphärisch</li> <li>SP: -9,5 - +34,5 D</li> <li>ZP: 1,0 - 11,0 D (0,5 D Schritte)</li> </ul>
Staar toric (STAAR Surgical Company, Lake Forest, USA)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Silikon + hydrophiles Acryl</li> <li>10,8/11,2 mm Durchmesser</li> <li>6,0 mm Optik-Durchmesser</li> <li>Plattenhaptik</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Asphärisch</li> <li>SP: 9,5 - 28,5 D</li> <li>ZP: 2,0 oder 3,5 D</li> </ul>
Morcher 89A/92S (Morcher GmbH, Stuttgart, Deutschland)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Hydrophiles Acryl</li> <li>15,0 mm Durchmesser</li> <li>6,0 mm Optik-Durchmesser</li> <li>C-Schlaufen-Haptik</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sphärisch</li> <li>SP: 10,0 - 30,0 D</li> <li>ZP: 0,5 - 8,0 D (0,25 D Schritte)</li> </ul>
Hoya iSert toric preloaded IOL system (Hoya, Tokyo, Japan)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Hydrophobes Acryl mit PMMA-Haptikenden</li> <li>12,5 mm Durchmesser</li> <li>6,0 mm Optik-Durchmesser</li> <li>Modifizierte C-Schlaufen-Haptik</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Asphärisch</li> <li>SP: 6,0 - 30,0 D</li> <li>ZP: 1,5 - 6,0 D (0,75 D Schritte)</li> </ul>

Lentis Tplus (Oculentis GmbH, Berlin, Deutschland)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hydrophiles Acryl mit hydrophober Oberfläche</li> <li>• 11,0 mm Durchmesser</li> <li>• 6,0 mm Optik-Durchmesser</li> <li>• Plattenhaptik</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Asphärisch</li> <li>• SP: -10,0 - +35,0 D</li> <li>• ZP: 0,25 - 12,0 D (0,75 D Schritte, spezielle Anfertigung in 0,01 D Schritten)</li> </ul>
Light-adjustable lens (RxSight Inc., Aliso Viejo, USA)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Silikon mit PMMA-Haptik</li> <li>• 13,0 mm Durchmesser</li> <li>• 6,0 mm Optik-Durchmesser</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Asphärisch</li> <li>• SP: 17,0 - 24,0 D</li> <li>• ZP: 0,75 - 2,0 D</li> <li>• Licht-adjustierte Veränderung der Brechkraft</li> </ul>
Microsil/Torica customized (Human Optics AG, Erlangen, Deutschland)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Silikon mit PMMA-Haptik</li> <li>• 11,6 mm Durchmesser</li> <li>• 6,0 mm Optik-Durchmesser</li> <li>• C-Schlaufen-Haptik</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sphärisch</li> <li>• SP: -10,0 - +35,0 D</li> <li>• ZP: 1,0 - 15,0 D (1,0 D Schritte, speziell angefertigt höhere ZP möglich)</li> </ul>
enVista toric (Bausch & Lomb GmbH, Berlin, Deutschland)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hydrophobes Acryl</li> <li>• 12,5 mm Durchmesser</li> <li>• 6,0 mm Optik-Durchmesser</li> <li>• C-Schlaufen-Haptik</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Asphärisch</li> <li>• SP: 6,0 - 30,0 D</li> <li>• ZP: 1,25 - 5,75 D (0,75 D Schritte)</li> </ul>
Auroflex toric (Aurolab, Tamil Nadu, Indien)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hydrophiles Acryl</li> <li>• 12,0/12,5 mm Durchmesser</li> <li>• 6,0 mm Optik-Durchmesser</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Asphärisch</li> <li>• SP: 10,0 - 30,0 D</li> <li>• ZP: 1,5 - 6,0 D (0,5 D Schritte)</li> </ul>

**Tabelle 2:** Übersicht gängiger, aktuell verfügbarer monofokaler torischer Intraokularlinsen (mod. nach (THULASIDAS, KADAM, 2024). D: Dioptrien; PMMA: Polymethylmethacrylat; SP: sphärische Power; ZP: zylindrische Power.

Eine Übersicht mitsamt technischen Daten, Herstellerangaben und optimierten Konstanten fast aller verfügbaren IOL liefert die Website <https://iolcon.org/>. Zusätzlich bietet diese Website direkt die Möglichkeit einer Online-Kalkulation der ausgewählten IOL.

#### 3.4.4 Indikationen und Kontraindikationen der torischen IOL

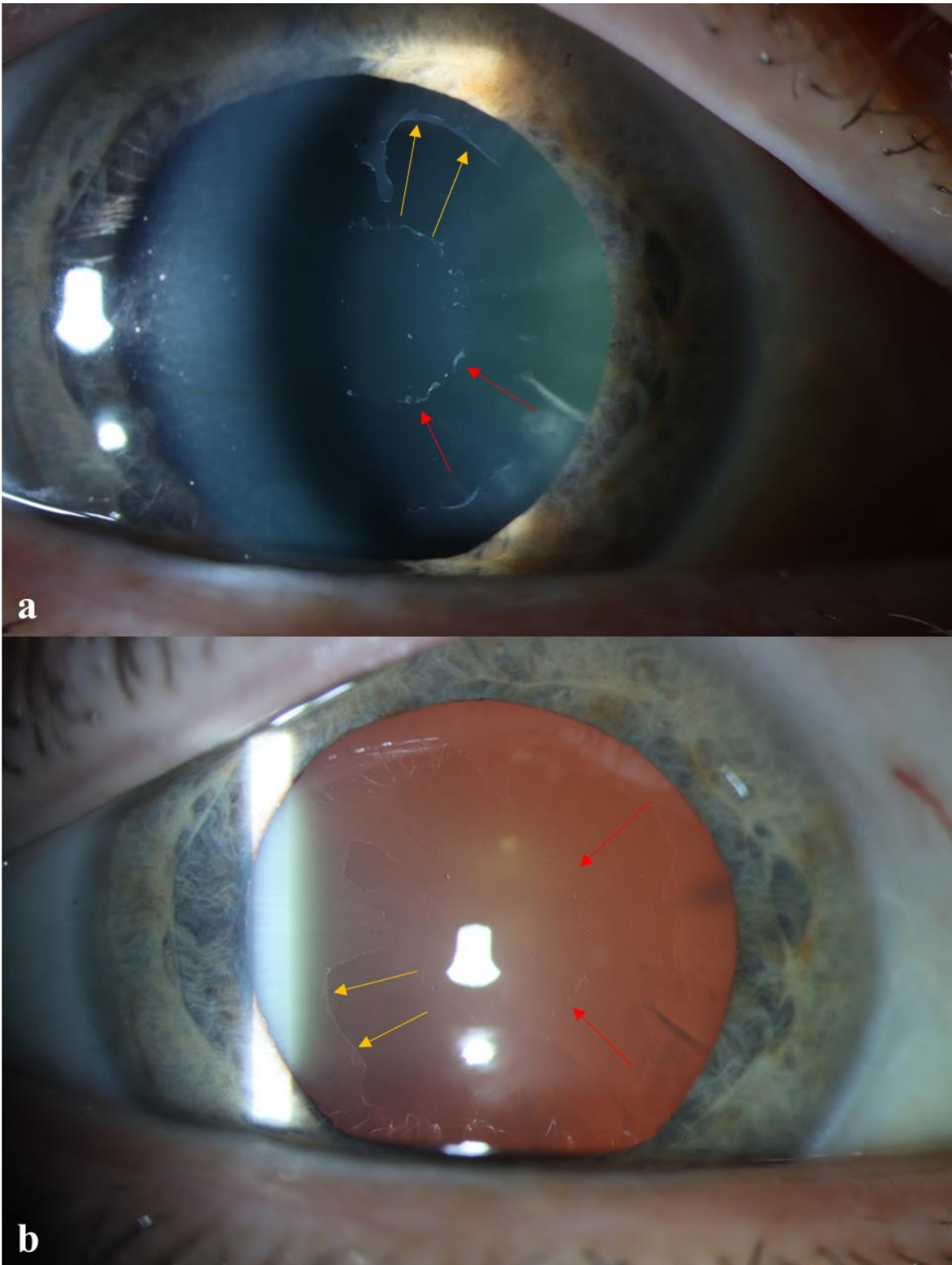
Vor der Implantation einer torischen IOL sollten verschiedene Kriterien erfüllt sein, um ein bestmögliches postoperatives Ergebnis zu erzielen. Dieses hängt maßgeblich von der Patientenselektion, einer umfassenden Evaluation der präoperativen Diagnostik, einer präzisen IOL-Berechnung, der operativen Technik und engmaschiger postoperativer Versorgung ab.

Gleichermaßen sollten die individuellen Erwartungen und Ansprüche des Patienten im Voraus ausführlich mit dem behandelnden Arzt kommuniziert worden sein.

Eine umfassende ophthalmologische Untersuchung inklusive Fern- und Nahvisusbestimmung, subjektiver und objektiver Refraktion, kornealer Topographie, Keratometrie, Funduskopie, Spaltlampenbiomikroskopie, laser- oder ultraschallgestützter Biometrie und optischer Kohärenztomographie des hinteren Augenabschnittes zum Ausschluss einer retinalen Begleitpathologie sollte stets präoperativ erfolgen.

Patienten mit mildem bis moderatem regulärem Astigmatismus  $\geq 0,75$  D in Fliegen-Konfiguration („bowtie“ astigmatism) sind für eine torische IOL-Implantation in der Regel gut geeignet. In Fällen von abgeheilten, postinfektiösen oder posttraumatischen kornealen Vernarbungen ohne Progression kann ebenfalls eine torische IOL-Implantation erfolgen, sofern die zentrale optische Achse der Hornhaut nicht von der Narbe betroffen ist (RA et al., 2020). Bei pädiatrischen Patienten zeigte die Implantation einer torischen IOL in der Vergangenheit akzeptable Ergebnisse, sollte jedoch aufgrund hoher Komplikationsraten und schlechter Vorhersagbarkeit des langfristigen refraktiven Ergebnisses stets eine Einzelfallentscheidung bleiben (ALTHOMALI, 2013; RAM et al., 2017). Patienten nach Keratoplastik weisen neben höherem Astigmatismus durch die notwendige systemische und lokale Kortikosteroidtherapie oftmals eine frühzeitige Kataraktentwicklung auf und eignen sich somit bei regulärer Ausprägung des Astigmatismus für eine torische IOL-Implantation. Bei pseudophaken Patienten nach Keratoplastik mit Hinterkammer-IOL im Kapselsack besteht die Option einer sekundären torischen Add-on-IOL-Implantation in den Sulcus ciliaris (= Furche zwischen hinterer Oberfläche der Irisbasis und vorderer Oberfläche des Ziliarkörpers).

Kontraindikationen für die Implantation einer intrakapsulären torischen Hinterkammerlinse (HKL) lassen sich in relative und absolute unterteilen. Absolute Kontraindikationen umfassen Zonulopathien wie die Zonulainsuffizienz beim Pseudoexfoliationssyndrom (Abb. 6) oder die traumatisch induzierte Zonulolyse, da eine Stabilität des Kapselsack-IOL-Komplexes postoperativ für ein erfolgreiches Ergebnis gewährleistet sein muss (MOHANKUMAR, MOHAN, 2025).



**Abbildung 6:** Spaltlampenphotographien eines Auges mit Pseudoexfoliationssyndrom in Mydriasis. Die typischen weißlichen Ablagerungen entlang des Pupillarsaums und des Linsenkortex auf der Linsenvorderfläche sind bei Spaltaufnahme (a) und bei retrograder Beleuchtung (b) deutlich erkennbar.

Patienten mit rezidivierenden Episoden einer anterioren oder posterioren Uveitis und Synechien (= Verklebungen zwischen Hornhaurückfläche und Irisvorderfläche bzw. zwischen Irisrückfläche und Linsenvorderfläche), mit aktiver intraokulärer Entzündung oder insuffizient reguliertem Glaukom sollten ebenfalls keiner torischen IOL-Implantation unterzogen werden.

Die Mydriasischwäche stellt eine relative Kontraindikation dar, da sie die Überprüfung der Achsenausrichtung der torischen IOL im Kapselsack (Ausrichtungsmarkierungen auf dem Rand der IOL) verunmöglichen kann (VISSER et al., 2013). Korneale Narben, Dystrophien und Krümmungsanomalien limitieren die Effektivität und Präzision der astigmatischen Korrektur und sollten nach Möglichkeit mit ausreichendem Zeitabstand zuvor separat behandelt werden. Es sollte bedacht werden, dass bei Patienten mit progressiver kornealer Dystrophie zu späterem Zeitpunkt eine Keratoplastik notwendig werden kann, die die Konfiguration der Hornhaut und damit auch den kornealen Astigmatismus verändert. Patienten mit KK oder PMD sollten nur bei minimalem Progressionsrisiko der Erkrankung und seit mindestens einem Jahr stabiler Refraktion mit einer torischen IOL versorgt werden (MATALIA et al., 2020; NANAVATY et al., 2012; VISSER et al., 2013). Bestehende okuläre Komorbiditäten wie Amblyopien (= Schwachsichtigkeit eines oder beider Augen basierend auf einer unzureichenden Entwicklung des Sehsystems in der Kindheit) oder retinale Pathologien müssen präoperativ erfasst werden und können ebenfalls relative Kontraindikationen darstellen.

### 3.4.5 Die moderne Kataraktoperation mit torischer IOL

Die moderne Kataraktoperation mit Implantation einer torischen IOL läuft wie folgt ab: Am sitzenden Patienten wird an der Spaltlampe bei spielender Pupille die Implantationsachse markiert. Gegebenenfalls wird auch eine Referenzachse (z.B. horizontal bei 0° und 180°) markiert. Die Pupille wird mit topischen Mydriatika dilatiert. Nach Applikation von Lokalanästhetikum entweder in Tropfenform oder subtenonal/retrobulbär erfolgt die Desinfektion der Augenoberfläche und ein steriles Abkleben des Operationsfeldes. In Ausnahmefällen (z.B. bei Kopftremor) kann eine Larynxmasken- oder Intubationsnarkose notwendig sein. Nach Positionierung des Operationsmikroskops wird über eine oder zwei Parazentesen ein Viskoelastikum zum Schutz der intraokulären Strukturen und zur Stabilisierung des Augapfels in die vordere Augenkammer gegeben. Anschließend erfolgt der Hauptzugangsschnitt (< 3,0 mm) korneal (clear-cornea-incision, CCI), limbokorneal (limbocorneal incision, LCI) oder sklerokorneal (sclerocorneal incision, SCI). Dieser wird in

einer multiplanaren Art und Weise gesetzt, sodass später ein nahtloses Abdichten der Wunde gewährleistet ist. Intraokulär folgt die Kapsulorhexis, eine Eröffnung der vorderen Linsenkapsel in zirkulärer Art und Weise in etwas kleinerem Durchmesser (ca. 1 mm) als die Optik der zu implantierenden IOL. Mittels Hydrodissektion (Wassereinspritzung) wird der Linseninhalt vom ihn umgebenden Kapselsack gelöst und mobilisiert. Die körpereigene Linse wird mittels Phakoemulsifikation zertrümmert und aspiriert. Kortexreste werden mittels Irrigation/Aspiration (I/A) gründlich entfernt. Nach Injektion eines Viskoelastikums in den Kapselsack wird die gefaltete IOL über ein spezielles Injektionssystem in den anterior eröffneten Kapselsack implantiert. Sie entfaltet sich innerhalb des Auges selbstständig. Anschließend wird die IOL manuell in die gewünschte Achsenlage rotiert. Die korrekte Achsenausrichtung wird anhand der Markierungen auf dem Rand der torischen IOL kontrolliert. Neuere digitale Tracking-Systeme erlauben dem Mikrochirurgen eine markierungslose Überprüfung der Achsenlage durch ein virtuelles Overlay im Operationsmikroskop. Intraokulär verbleibendes Viskoelastikum wird - insbesondere auch hinter der IOL - abgesaugt, die Instrumente werden aus dem Situs entfernt und das Auge mit einem sterilen Verband abgedeckt. Bei der Implantation einer torischen Add-on-IOL wird nach identischer Vorbereitung die gefaltete Kunstlinse über einen kornealen Zugangsschnitt in den Sulcus ciliaris implantiert. Die Überprüfung der korrekten Achsenausrichtung erfolgt in analoger Art und Weise.

#### 3.4.6 Kalkulation

Die präzise Berechnung der IOL ist für das refraktive Ergebnis einer Linsenoperation mindestens genauso entscheidend wie die Operation selbst. Ziel der IOL-Kalkulation bei monofokaler IOL ist es, dem Patienten postoperativ möglichst eine Brillenunabhängigkeit beim Distanzsehen oder bei Zielrefraktion im Minusbereich (z.B. SÄ = -2,5 D) ein Lesen ohne Brille zu ermöglichen. In den letzten Jahrzehnten hat sich die IOL-Kalkulation durch den Einsatz biometrischer Messverfahren, komplexer Rechenmodelle und verbesserter Formeln stetig weiterentwickelt. Die ersten IOL-Kalkulationsformeln gehen auf Svyatoslav Fyodorov und Alexander Galin zurück und basieren auf den Gesetzen der optischen Vergenz (FYODOROV et al., 1975; FYODOROV et al., 1967). Die Vergenz beschreibt, wie stark Lichtstrahlen durch ein optisch wirksames System zusammengeführt oder auseinandergeleitet werden. Die Vergenz kann durch die folgende Formel beschrieben werden:

$$\text{Vergenz (D)} = \frac{n}{r}$$

Dabei beschreibt  $n$  den Brechungsindex des Mediums und  $r$  den Abstand zum Brennpunkt in Metern. Die IOL-Berechnung basiert auf der optischen Abbildungsgleichung und dem Prinzip der paraxialen Optik. Ziel der Berechnung ist eine möglichst exakte Bestimmung eben der IOL-Stärke, die notwendig ist, um die ins Auge einfallenden Lichtstrahlen auf der Retina zu bündeln. Die grundlegende Formel kann wie folgt beschrieben werden:

$$P = \frac{(nL - nKW)}{L - d} - \frac{(nC - nKW)}{d}$$

Dabei gilt:  $P$  ist die IOL-Stärke in D,  $nL$ ,  $nKW$  und  $nC$  sind die jeweiligen Brechungsindices von Linse, Kammerwasser und Hornhaut,  $L$  ist die Achsenlänge und  $d$  die effektive Linsenposition (ELP). Die ELP beschreibt die prognostizierte Position der implantierten IOL nach der Operation. Hinzu kommen dann noch Korrekturen der Hornhautbrechkraft sowie Anpassungen bei von Emmetropie abweichender Zielrefraktion.

Während klassische Berechnungsformeln wie die SRK/T, Hoffer Q oder Holladay I vor allem auf axialer Länge und Hornhautradien basieren (HOFFER, 1981; HOLLADAY et al., 1988; RETZLAFF et al., 1990), verwenden moderne Generationen wie die Barrett Universal II, Olsen oder die Hill-RBF-Methode zusätzliche Parameter wie die Vorderkammertiefe, Linsendicke und sogar auf künstlicher Intelligenz basierende Algorithmen zur Optimierung der Vorhersagegenauigkeit (BARRETT, 1993; HILL, HAEHNLE, 2024; OLSEN, 2007). Die Herausforderung der IOL-Kalkulation liegt dabei nicht nur in der Auswahl einer geeigneten Formel, sondern auch in der präzisen Erfassung und Interpretation der biometrischen Daten, insbesondere bei anatomischen Besonderheiten wie extrem kurzen ( $AL \leq 21$  mm) oder langen ( $AL \geq 25$  mm) Augen.

Im Gegensatz zur biometriebasierten Kalkulation bei intrakapsulären IOL erfolgt die Berechnung der Linsenstärke bei Add-On-Linsen refraktionsbasiert. Die Achsenlänge des Auges wird für die Berechnung hierbei nicht benötigt, da kein optisch wirksames Medium aus dem Auge entfernt wird. Aus der Differenz der bestehenden Refraktion und der Zielrefraktion kann die zu implantierende IOL-Stärke berechnet werden.

Bei der Kalkulation torischer IOL sind mehrere Faktoren für ein optimales Ergebnis relevant: Beide Hornhautflächen, d.h. Vorder- und -rückfläche müssen mittels Keratometrie oder Topographie ausgemessen werden, da die Rückfläche meist einen gegenläufigen Astigmatismus von etwa 0,5 D erzeugt. Ein Miteinberechnen des durch den Hauptschnitt

verursachten SICA ist wichtig. Die Höhe des SICA hängt von der Schnittposition (z.B. temporal/superior) und von der Schnittbreite ab. Diese Werte sollten sodann zusammen mit der präoperativen Biometrie in einen modernen torischen IOL-Kalkulator eingegeben werden.

### 3.5 Fragestellung

Ziel dieser Arbeit war eine Analyse und ein Vergleich der funktionellen und refraktiven Ergebnisse nach Implantation torischer IOL – entweder intrakapsulär oder als Add-on – bei Augen mit vorangehender PKP oder DALK. Ein besonderer Fokus der Arbeit lag auf der Analyse der vektoriellen Astigmatismusveränderung nach Implantation der tIOL, da diese sich oft wesentlich von der Entwicklung in nicht voroperierten Augen unterscheidet. Darüber hinaus wurde die Entwicklung der kornealen Endothelzellzahl sowie die häufigsten Komplikationen nach der Implantation analysiert. Die Subgruppe der torischen Add-on-IOL wurde zudem gezielt untersucht und mit der Gruppe der intrakapsulären tIOL verglichen, um ggf. Rückschlüsse auf eine optimale zukünftige Versorgung ziehen zu können. Durch die in der Studie gewonnenen Erkenntnisse sollte in Zukunft die Identifikation der geeignetsten Augen für eine tIOL-Implantation nach vorangehender Keratoplastik sowie eine Optimierung der präoperativen IOL-Kalkulation ermöglicht werden.

## 4 Patienten und Methodik

### 4.1 Patienten

In diese retrospektive Studie wurden insgesamt 134 Augen nach vorangehender PKP oder DALK eingeschlossen, die im Zeitraum von 2008 bis 2024 an der Klinik für Augenheilkunde des Universitätsklinikum des Saarlandes (UKS) eine torische IOL-Implantation entweder intrakapsulär oder als Add-on-IOL erhielten. Bei allen Patienten wurden die systemischen Vorerkrankungen sowie okuläre Komorbiditäten erfasst. Zusätzlich wurden die Eigenschaften der vorangehenden Keratoplastik erfasst: Indikation (korneale Ektasie, Dystrophie, Narbe, akute Infektion/Ulzeration, traumatische Perforation), Variante (PKP oder DALK), Größe des Transplantats (Spender und Empfänger), Art der Fadenführung (Einzelknüpfnähte oder doppelt-fortlaufende Naht), Art der Trepanation (konventionell mechanisch, Excimerlaser-assistiert, Femtosekundenlaser-assistiert). Außerdem erfasst wurden Eingriffe, die nach der Keratoplastik bereits zur Korrektur des Astigmatismus durchgeführt worden waren (limbusparallele Keratotomien, Kompressionsnähte, Re-Keratoplastik). Die postoperativen Komplikationen wurden ebenfalls untersucht: Auftreten eines zystoiden Makulaödems, Notwendigkeit einer Nachrotation der torischen IOL aufgrund einer relevanten Veränderung der intendierten Achslage, Auftreten einer endothelialen Abstoßungsreaktion des Hornhauttransplantates.

### 4.2 Verwendete Untersuchungsmethoden

#### 4.2.1 Klinisch

Die klinische Untersuchung umfasste:

- die Spaltlampenbiomikroskopie zur Untersuchung des gesamten vorderen Augenabschnittes inkl. Hornhaut, Vorderkammer und Linse.
- die Funduskopie in Mydriasis (= bei dilatierter Pupille) zur Evaluation retinaler Veränderungen und Auffälligkeiten.
- die Bestimmung des unkorrigierten und bestkorrigierten Fernvisus („uncorrected visual acuity“, UCVA und „best-corrected visual acuity“, BCVA) im 6-Meter-Abstand bei

adäquater Raumbeleuchtung mit Zahlen als Optotypen (= Sehzeichen für die Vermessung der Sehleistung).

- die subjektive Refraktionsbestimmung. Die subjektive Refraktion eines Auges beschreibt die Bestimmung eben der Brillenglas- oder Kontaktlinsenstärke, mit der ein Mensch das Sehen als optimal empfindet. Die subjektive Refraktion weicht meist von der objektiven Refraktion durch z.B. ein Autorefraktometer ab. Im Unterschied zur objektiven Refraktionsbestimmung basiert die subjektive Refraktion auf unmittelbaren Rückmeldungen des Patienten. Sie ist daher bei Kleinkindern, Menschen mit Sprachbarriere oder kognitiver Einschränkung nicht oder nur teilweise möglich.

#### 4.2.2 Apparativ

Die apparative Untersuchung umfasste (Abb. 7):

- die **objektive Refraktionsbestimmung** mittels Autorefraktometer NIDEK AR-1 (Tomey Corp., Nagoya, Japan). Das NIDEK AR-1 arbeitet mit der sogenannten Fundusreflex-Methode. Es nutzt eine superlumineszente Diode, über die ein infraroter Lichtstrahl (Wellenlänge ca. 850 nm) in das Auge projiziert wird. Nach Durchtritt des Lichtstrahls durch die brechenden Medien wird er am retinalen Pigmentepithel reflektiert und von einem speziellen Sensor (meist Charge-Coupled-Device, CCD) aufgefangen und analysiert. Die Messung mit dem NIDEK AR-1 ist kontaktfrei und binnen weniger Sekunden durchführbar.
- die **Biometrie** mit dem IOL-Master 500 bzw. 700 (Carl Zeiss Meditec AG, Oberkochen, Deutschland). Die Biometrie bezeichnet die Vermessung der anatomischen Eigenschaften des Auges. Darunter fallen die Achsenlänge (AL), die Keratometrie (flacher und steiler Krümmungsmedian der Hornhaut) mittels integriertem Keratometer, der Weiß-zu-Weiß-Durchmesser der Hornhaut („white-to-white“, WTW), die externe Vorderkammertiefe (VKT) sowie in neueren Generationen die Linsendicke. Die ältere Generation, der IOL-Master 500, nutzt die partielle Kohärenz-Interferometrie als Messprinzip (DREXLER et al., 1998; HAIGIS et al., 2000): Dabei wird ein Lichtstrahl von ca. 780 nm Wellenlänge mithilfe eines Strahlteilers in zwei Teile gespalten: einen Referenzstrahl und einen Messstrahl. Während der Referenzstrahl an einer bekannten Fläche gespiegelt wird, wird der Messstrahl von verschiedenen Strukturen innerhalb des Auges reflektiert (Hornhaut, Linse, Netzhaut). Nach Wiederaustritt des Messstrahls aus dem Auge entsteht so ein Laufzeitunterschied

zwischen beiden Strahlen, der je nach Brechungsindex des durchquerten Mediums in eine Distanz umgerechnet werden kann. Mithilfe der partiellen Kohärenz-Interferometrie können Distanzen innerhalb des Auges (außer bei Vorliegen einer relevanten Medientrübung) bis auf wenige Mikrometer präzise erfasst werden (DREXLER et al., 1997). Die neuere Generation, der IOL-Master 700, nutzt die sogenannte „Swept-Source“-optische Kohärenztomographie (SS-OCT). Die SS-OCT ist eine Weiterentwicklung der klassischen Laserinterferometrie und nutzt einen konfigurierbaren Laser, dessen Wellenlänge durch ein breites Spektrum geschwenkt („gesweept“) wird, um die Tiefe einer Struktur zu bestimmen. Dabei werden Laserstrahlen größerer Wellenlänge (mittlere Wellenlänge ca. 1050 nm) verwendet. Das langwelligere Infrarotlicht kann auch bei fortgeschrittener Medientrübung (z.B. dichter Katarakt) tief ins Auge eindringen und verlässlich biometrische Daten erheben (SRIVANNABOON et al., 2015). Der IOL-Master führt pro Analyse 5 Messungen durch und kalkuliert den Mittelwert der erhobenen Daten. Die Biometrie ist vor der Implantation einer IOL obligat. Von der Qualität der präoperativen Biometrie hängt maßgeblich das Erreichen der postoperativen Zielrefraktion ab. Die Untersuchung mit dem IOL-Master ist kontaktfrei und vermeidet so potentielle Risiken wie korneale Erosion (= Aufbruch der Epithelzellschicht) oder Infektion. Die Untersuchung ist innerhalb von Sekunden durchführbar. Im Rahmen dieser Studie wurden lediglich präoperativ Daten mit dem IOL-Master erhoben.

- die **korneale Tomographie** mittels Scheimpflugkamera (Pentacam bzw. Pentacam High Resolution (HR), Oculus Optikgeräte, Wetzlar, Deutschland). Das Messprinzip der Scheimpflugtomographie basiert auf einer rotierenden Spaltlicht-Kamera mit blauer Leuchtdiode (MOTLAGH et al., 2019). Während der Patient eine zentrale Lichtquelle fixiert, rotiert die Kamera um die optische Achse des Auges, erstellt in allen Segmentpositionen radial angeordnete Schnittbilder des vorderen Augenabschnittes und fügt diese in einer dreidimensionalen Abbildung zusammen. Eine zweite Kamera registriert patienteneigene Bewegungen des Auges, die durch die integrierte Software automatisch korrigiert werden, um Artefakte zu reduzieren. Optisch gekrümmte Flächen können so mit einer hohen Tiefenschärfe abgebildet werden. Der von der Pentacam erhobene Datensatz umfasst Vorder- und Rückflächentomographie der Hornhaut, Pachymetrie (= Vermessung der Hornhautdicke), Vorderkammertiefe, Vorderkammervolumen, Kammerwinkel und ggf. Linsenposition und -densitometrie (= Linsentransparenz). Darüber hinaus erstellt die Pentacam-Software eine Reihe statistischer Indices, die das untersuchte Auge

beispielsweise mit einer gesunden Kontrollpopulation oder einer Kontrollgruppe von Patienten mit gesichertem Keratokonus vergleichen und so die Früherkennung ektatischer Hornhauterkrankungen ermöglichen (z.B. Belin-Ambrosio-Enhanced-Ectasia Display). Die Untersuchungszeit der Pentacam-Messung beträgt 2 Sekunden. Zu beachten ist, dass Unterbrechungen des kornealen Tränenfilms z.B. durch Kontaktlinsengebrauch die Ergebnisse der Pentacam-Messung verfälschen können. Bei Kontaktlinsenträgern ist daher eine ausreichende Kontaktlinsenkaenz im Vorfeld der Untersuchung sinnvoll (> 5 Tage bei Trägern weicher Kontaktlinsen, > 1 Woche bei Trägern formstabiler Kontaktlinsen). In dieser Studie wurde die Darstellung „Refraktiv“ analysiert. In dieser Darstellung erhält man eine topometrische „Karte“ der Hornhaut innerhalb einer Zone von 8,0 mm bzw. 12,0 mm, in der die axiale und sagittale Krümmung der Hornhautvorder- und -rückfläche, die Pachymetrie, die True Net Power, die Asphärizität der Hauptmeridiane sowie eine Auswahl der oben genannten Indices dargestellt sind. Darüber hinaus können mittels Zernike-Polynomen und Fourier-Analyse die Aberrationen höherer Ordnung (HOA) untersucht werden. Einzug in die Studie fanden dabei die kornealen Unregelmäßigkeiten, der Mittelwert aller kornealen Aberrationen, der Mittelwert der Aberrationen niedriger sowie höherer Ordnung, die Regelmäßigkeit des peripheren und zentralen kornealen Astigmatismus und Koma.

- die **korneale Topographie** mittels Topographic Modeling System - 5 (TMS-5, Tomey Corp., Nagoya, Japan). Das TMS-5 kombiniert die Funktion einer Scheimpflugkamera, einer Placido-Scheibe sowie der Aberrometrie (= Messung von Abbildungsfehlern niedriger und höherer Ordnung). Die Funktionsweise der Scheimpflugkamera ist oben beschrieben (siehe Pentacam). Die Analyse der Topographie mittels Placido-Scheibe funktioniert wie folgt: Von einer ringförmigen Lichtquelle (LED-Licht) wird Licht auf die Hornhaut projiziert; dieses Licht wird durch den präkornealen Tränenfilm reflektiert und von der Kamera registriert. Die Aberrometrie basiert auf einer Wellenfrontanalyse: in einem perfekten optischen Apparat würde eine ebene Wellenfront aus Licht ihre Form bei Austritt aus dem Apparat beibehalten. Im menschlichen Auge wird diese Wellenfront allerdings durch Unregelmäßigkeiten der lichtbrechenden Medien mehr oder weniger stark verzerrt. Neben den Aberrationen niedriger Ordnung (Myopie, Hyperopie, Astigmatismus) erlaubt die Wellenfrontmessung auch eine Analyse der Aberrationen höherer Ordnung („higher order aberrations“, HOA) wie Koma, Trefoil und sphärischer Aberration. Die Untersuchung

mittels TMS-5 wurde im Rahmen dieser Studie postoperativ nur selten durchgeführt, weswegen auf eine gesonderte Analyse verzichtet wurde.

- die **korneale endotheliale Spektralmikroskopie** mittels EM-4000 (Tomey Corp., Nagoya, Japan). Das EM-4000 funktioniert über eine kontaktfreie Spiegelreflexmikroskopie des kornealen Endothels (= innerste Zellschicht der Hornhaut) mit automatischer Fokussierung. Das Endothel wird von einer Leuchtdiode fokussiert beleuchtet. Das von den Endothelzellen reflektierte Licht wird von einer Kamera aufgefangen. Ein in der Software verarbeiteter Algorithmus erkennt die Zellgrenzen und kalkuliert die Zellzahl/mm<sup>2</sup>. Das EM-4000 ermöglicht die Analyse der Endothelzelldichte, des Pleomorphismus (mit Ermittlung des Anteils an hexagonalen Endothelzellen) und des Polymegathismus (= Standardabweichung der Zellfläche) der Endothelzellen. Darüber hinaus gibt es eine ultraschallbasierte Pachymetrie des untersuchten Hornhautareals an.
- die **optische Kohärenztomographie des vorderen Augenabschnitts** mittels CASIA2 (Tomey Corp., Nagoya, Japan). Das CASIA2 arbeitet ebenfalls mit der SS-OCT und erlaubt eine hochauflösende, dreidimensionale Darstellung sämtlicher Strukturen des vorderen Augenabschnittes (HARA et al., 2024). Mit einer durchschnittlichen Wellenlänge von 1310 nm des eindringenden Lichts ermöglicht das CASIA2 eine tiefe Gewebepenetration. Durch die hohe Bilderfassungsrate (50.000 Scans pro Sekunde) entsteht eine hohe Bildauflösung (axial 10 µm, transversal 30 µm) von der vorderen Hornhautoberfläche bis zur Linsenrückfläche (SHOJI et al., 2017). Im Falle einer im Sulcus ciliaris positionierten Add-On-IOL bzw. einer implantierbaren Collamer-Linse („implantable collamer lens“, ICL) erlaubt das CASIA2 eine exakte Vermessung des sogenannten Vaults. Der Vault beschreibt den Abstand zwischen Rückfläche einer im Sulcus ciliaris positionierten Kunstlinse und der Vorderfläche der natürlichen Augenlinse bzw. der im Kapselsack befindlichen Hinterkammer-IOL. Zu beachten ist, dass eine Messung jenseits der Iris (= Regenbogenhaut) meist nicht möglich ist, da das im Vergleich zu Hornhaut und Linse stärker pigmentierte Irisgewebe den vom Gerät ausgehenden Lichtstrahl nahezu vollständig absorbiert.
- die **optische Kohärenztomographie der Makula** (Makula-OCT, Heidelberg Engineering, Heidelberg, Deutschland). Die Makula-OCT basiert ebenfalls auf einer interferometrischen

Laufzeitmessung des Lichts mit einer breitbandigen Nahinfrarotlichtquelle, Mess- und Referenzlichtstrahl. Bei der Aufnahme werden viele A-Scans der Netzhaut nebeneinander zu einem B-Scan zusammengefügt. Anschließend kann durch einen Algorithmus aus mehreren B-Bildern ein volumetrisches 3D-Bild der Makula erstellt werden. Die Makula-OCT wurde im Rahmen dieser Studie präoperativ zum Erkennen retinaler Komorbiditäten sowie postoperativ zur Diagnostik eines zystoiden Makulaödems im Sinne eines Hruby-Irvine-Gass-Syndroms eingesetzt.



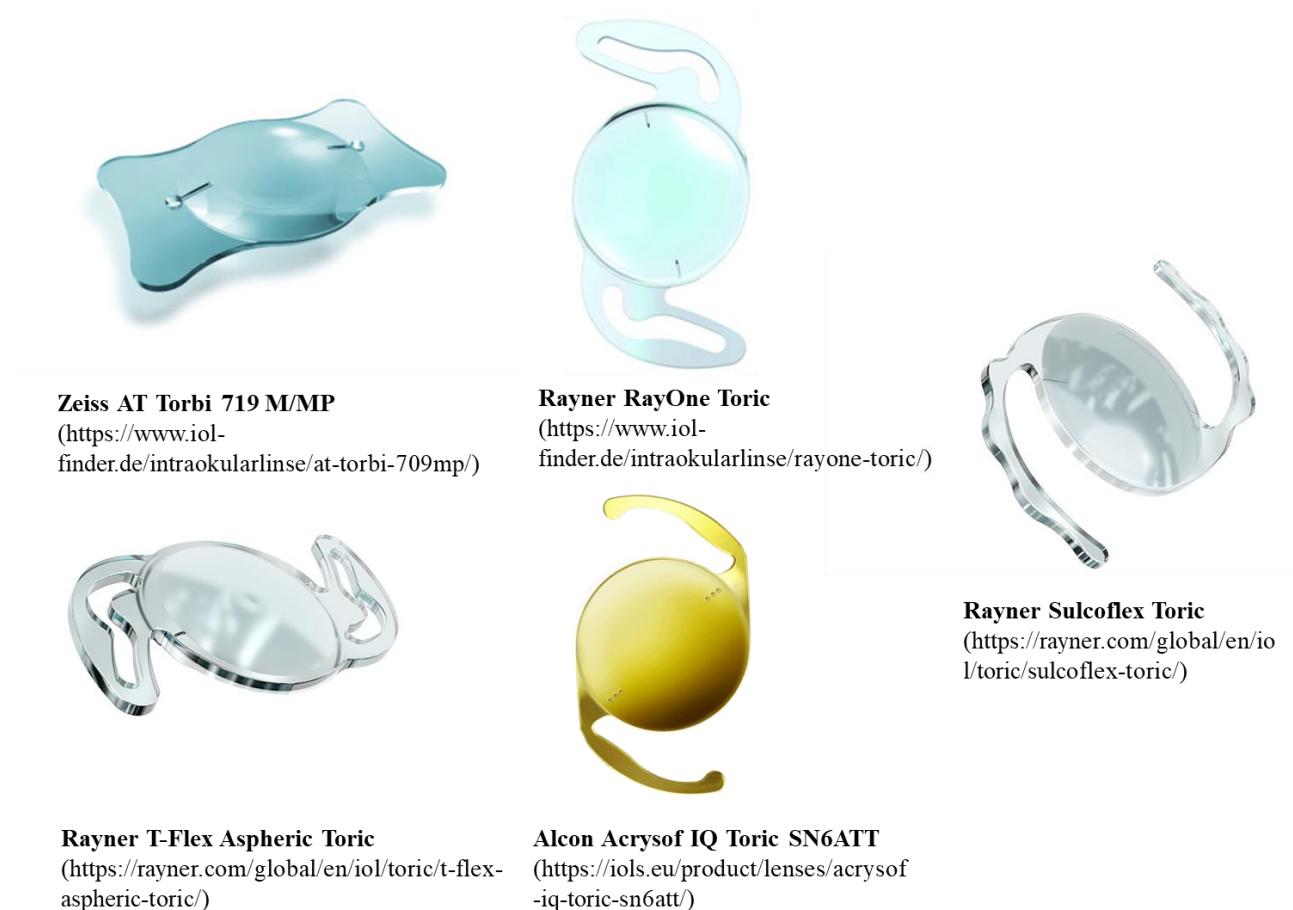
**Abbildung 7:** Übersicht der für die Datenerhebung verwendeten Untersuchungsgeräte: **a:** Autorefraktometer NIDEK AR-1 (Tomey Corp., Nagoya, Japan); **b:** IOL-Master 500 (ältere Generation); **c:** IOL-Master 700 (neuere Generation, Zeiss Meditec, Oberkochen, Deutschland); **d:** Pentacam HR (Oculus Optikgeräte, Wetzlar, Deutschland); **e:** Topographic Modeling System – 5 (Tomey Corp., Nagoya, Japan); **f:** Endotheliales Spiegelmikroskop EM-4000 (Tomey Corp., Nagoya, Japan); **g:** Optischer Kohärenztomograph des vorderen Augenabschnittes CASIA2 (Tomey Corp., Nagoya, Japan); **h:** Optischer Kohärenztomograph der Makula (Spectralis-OCT, Heidelberg Engineering, Heidelberg, Deutschland).

### 4.3 Implantierte IOL-Modelle

Die implantierten intrakapsulären IOL-Modelle waren (Abb. 8):

- AT Torbi 709M (Zeiss Meditec, Berlin, Deutschland)
- AT Torbi 719MP (Zeiss)
- T-flex aspheric 573T (Rayner, Worthing, Vereinigtes Königreich)
- T-flex aspheric 623T (Rayner)
- RayOne Toric, Superflex (Rayner)
- AcrySof Toric (Alcon, Fort Worth, USA).

Als Add-on-IOL-Implantation wurde die Sulcoflex Toric 653T (Rayner) verwendet.



**Abbildung 8:** Übersicht der im Rahmen dieser Studie implantierten torischen IOL-Modelle.

Die in dieser Studie zur Kalkulation der tIOL-Stärke verwendeten Online-Rechner der jeweiligen Hersteller sind im Folgenden aufgelistet:

- Zeiss Z CALC: <https://zcalc.meditec.zeiss.com/>
- Rayner Raytrace Calculator: <https://raytrace.eu.rayner.com/home>
- Alcon Toric Calculator: <https://www.myalcon-toriccalc.com/#/calculator>

Das Verhältnis von präoperativem topographischem Astigmatismus („Total Corneal Refractive Astigmatism“, TCRA) zu manifestem refraktivem Astigmatismus (MRA) wurde bestimmt. Die präoperative Abweichung zwischen der topographisch und der manifest refraktiv gemessenen steilen Achse des Astigmatismus wurden ebenfalls bestimmt. Der quadratische Mittelwert der Wellenfrontaberrationen höherer Ordnung („Wave Front Aberration Higher Order Root Mean Square“, WFA HORMS) wurde präoperativ bestimmt, um eine Aussage über die Höhe der irregulären Komponente des zugrundeliegenden Astigmatismus treffen zu können.

#### 4.4 Postoperative Therapie

Postoperativ wurden Prednisolon-Acetat-Augentropfen (10 mg/ml), Moxifloxacin-Augentropfen (5 mg/ml) und konservierungsmittelfreie Tränenersatzmittel jeweils fünf Mal täglich für zwei Wochen appliziert. Nach zwei Wochen wurde die Moxifloxacin-Applikation gestoppt und die Prednisolon-Acetat-Augentropfen wurden ausgeschlichen.

#### 4.5 Einschlusskriterien

In diese Studie wurden sämtliche Patienten eingeschlossen, die an der Klinik für Augenheilkunde des Universitätsklinikums des Saarlandes im Zeitraum 2008 bis 2024 aufgrund eines moderaten bis hohen regulären Astigmatismus  $\geq 1,5$  D nach vorangehender PKP oder DALK einer torischen intrakapsulären oder Add-on-IOL-Implantation unterzogen wurden. Es wurden lediglich mündige und volljährige Patienten inkludiert.

## 4.6 Ausschlusskriterien

Die Ausschlusskriterien in dieser Studie waren: Minderjährigkeit, reduzierte Transparenz des kornealen Transplantats (z.B. durch Narben), unvollständige Hornhautfadenentfernung vor Implantation einer IOL, Vorliegen eines hauptsächlich irregulären Astigmatismus innerhalb der zentralen 4 mm der Hornhaut, Implantation einer torischen IOL weder in den Kapselsack noch in den Sulcus ciliaris (z.B. retroiridal Iris-fixiert), visusrelevante Begleitpathologien des betroffenen Auges (z.B. fortgeschrittene altersbedingte Makuladegeneration, glaukomatöse Optikusatrophie, Amblyopie) sowie unzureichende Follow-Up-Untersuchungen. Insgesamt wurden im beobachteten Zeitraum 149 Augen nach vorheriger PKP oder DALK mit einer tIOL versorgt. Davon absolvierten fünfzehn Augen die postoperativen Folgeuntersuchungen nicht in unserer Klinik. Diese 15 Augen wurden aus der Analyse ausgeschlossen.

## 4.7 Statistische Methode

Die Datenerfassung erfolgte in einer Excel-Datenbank (Microsoft, Redmont, USA). Die statistische Analyse erfolgte mittels „Statistical Package for the Social Sciences“ (SPSS Version 27.0, IBM, Armonk, USA). Für die Erstellung der Grafiken wurde GraphPad Prism ver. 10.5 (GraphPad Software Inc., San Diego, Kalifornien, USA) verwendet. Zur Datenauswertung wurde das verallgemeinerte lineare Modell („generalized linear model“) angewandt. Prä- und postoperative Daten beider Gruppen wurde mit dem nicht-parametrischen Wilcoxon-Rangsummen-Test und bei Normalverteilung mittels gepaartem-t-Test analysiert. Eine Überprüfung auf Normalverteilung erfolgte mittels Shapiro-Wilk-Test. Die statistische Analyse von prä- und postoperativen Messungen zu unterschiedlichen Zeitpunkten innerhalb derselben Gruppe wurde mittels Friedman-Test durchgeführt. Eine Adjustierung für Mehrfachvergleiche erfolgte mittels Bonferroni-Korrektur. Visuswerte sind – falls nicht anderweitig gekennzeichnet – als Logarithmus des minimalen Auflösungswinkels (logMAR) angegeben. Werte von  $p < 0,05$  wurden als statistisch signifikant betrachtet. Eine post-hoc-Power-Analyse ergab, dass die Studie bei einem Signifikanzniveau von  $\geq 0,05$  nur moderate bis große Zwischen-Gruppen-Effekte detektieren konnte.

## 4.8 Vektoranalyse

Für die Dekomposition der keratometrischen Daten, der IOL-Stärke und der Refraktionswerte von der Standardnotation in Vektorstärken wurde eine Software in MATLAB v. 2024a (MathWorks, Natick, USA) programmiert. Der Astigmatismus wurde auf den  $0^\circ/90^\circ$ -Meridian und den  $45^\circ/135^\circ$ -Meridian projiziert. Die Vektorstärken C0 und C45 wurden mittels Double-Angle-Plot-Werkzeug analysiert, wobei der C0/C45-Vektor auf der X- bzw. Y-Achse aufgetragen ist. Fehlerellipsen für das 95%-Konfidenzintervall wurden von den Varianz-Kovarianz-Matrixen und den Zentroiden erstellt, wobei eine bivariate Normalverteilung angenommen wurde. Das Seitenverhältnis („Aspect Ratio“, AR) der Fehlerellipse wurde berechnet, um eine Aussage über ihre Rundheit treffen zu können. Die AR gleicht dem Verhältnis der großen Halbachse („Major Half Axis“, MHA) zu der kleinen Halbachse („Minor Half Axis“, MiHA). Ein Wert von 1 beschreibt dabei einen Kreis. MHA und ihre Orientierung in Grad ( $^\circ$ ) erlauben eine Interpretation darüber, ob eine Tendenz zu einer bestimmten Astigmatismus-Form (z.B. mit der Regel, gegen die Regel, oder schräg) vorliegt. Die keratometrischen, refraktiven und IOL-Stärke-Daten von linken Augen wurden im Vorzeichen umgedreht, was eine Präsentation der Daten mit der Orientierung rechter Augen ermöglichte.

Der induzierte Zielastigmatismus („Target Induced Astigmatism“, TIA), definiert als die erwünschte postoperative Reduktion des Astigmatismus sowie der chirurgisch induzierte Astigmatismus („Surgically Induced Astigmatism“, SIA), definiert als die tatsächlich erreichte Astigmatismusänderung nach der Operation wurden berechnet. Der Korrekturindex („Correction Index“, CI), definiert als  $SIA/TIA$  (wobei  $CI = 1$  eine vollkommene astigmatische Korrektur beschreibt) wurde ebenfalls berechnet. Der CI erlaubt eine Aussage darüber, ob mit dem Eingriff eine Über- oder Unterkorrektur des Astigmatismus erreicht wurde (Werte  $> 1$  für Überkorrektur, Werte  $< 1$  für Unterkorrektur). Die sphärozyklindrische Brillenrefraktion wurde mittels Rückwärts-Vergenz-Transformation auf die korneale Ebene umgerechnet.

## 5 Ergebnisse

### 5.1 Deskriptive Statistik

#### 5.1.1 Demographische Daten

In diese Studie wurden insgesamt 134 Augen von 117 Patienten nach Implantation einer torischen IOL (intrakapsulär oder Add-on) eingeschlossen (TEPING et al., 2026). Das mittlere Alter der im Gesamtkollektiv untersuchten Patienten lag bei  $59,9 \pm 11,5$  Jahren. Die Geschlechterverteilung (Männer/Frauen) betrug 80/54 (59,7/40,3 %). Die mittlere Zeit zwischen Keratoplastik und torischer IOL-Implantation betrug  $62,3 \pm 80,8$  (14 – 388) Monate. Die IOL-Implantation erfolgte an 68 rechten Augen (50,7 %) und an 66 linken Augen (49,3 %). Bei 20 Patienten (17 %) wurden beide Augen mit einer torischen IOL versorgt, die restlichen 97 Patienten (83 %) erhielten die torische IOL nur unilateral. Die Implantation der torischen IOL erfolgte bei 115 Augen (85,8 %) intrakapsulär (Gruppe 1, G1) und bei 19 Augen (14,2 %) sulkus-fixiert als Add-on (Gruppe 2, G2). Daten der 6-Wochen-Kontrolle wurden für 102 von 134 Augen (74 %), Daten der 10-Monats-Kontrolle für 121 Augen (90 %) erhoben. 103 von 115 Augen (89 %) in G1 und 18 von 19 Augen (94 %) in G2 absolvierten das letzte Follow-Up nach 10 Monaten.

Die häufigsten okulär relevanten systemischen Vorerkrankungen der eingeschlossenen Patienten können der folgenden Tabelle entnommen werden (Tab. 3):

<b>Systemische Erkrankung</b>	<b>Anzahl (%)</b>
Hypothyreose (Hashimoto-Thyreoiditis)	18 (13)
Diabetes mellitus Typ II	13 (10)
Diabetes mellitus Typ I	4 (3)
arterielle Hypertonie	3 (2)
Apoplex in der Vorgeschichte	3 (2)
Neurodermitis	1 (1)
Sarkoidose	1 (1)

**Tabelle 3:** Überblick der häufigsten systemischen Begleiterkrankungen des untersuchten Patientenkollektivs.

Eine Übersicht der okulären Komorbiditäten der eingeschlossenen Patienten liefert die folgende Tabelle (Tab. 4):

<b>Okuläre Komorbidität</b>	<b>Anzahl (%)</b>
Netzhauterkrankung	11 (8)
Abstoßungsreaktion in der Vorgeschichte	7 (5)
Glaukom	6 (4)
Sonstige	25 (19)

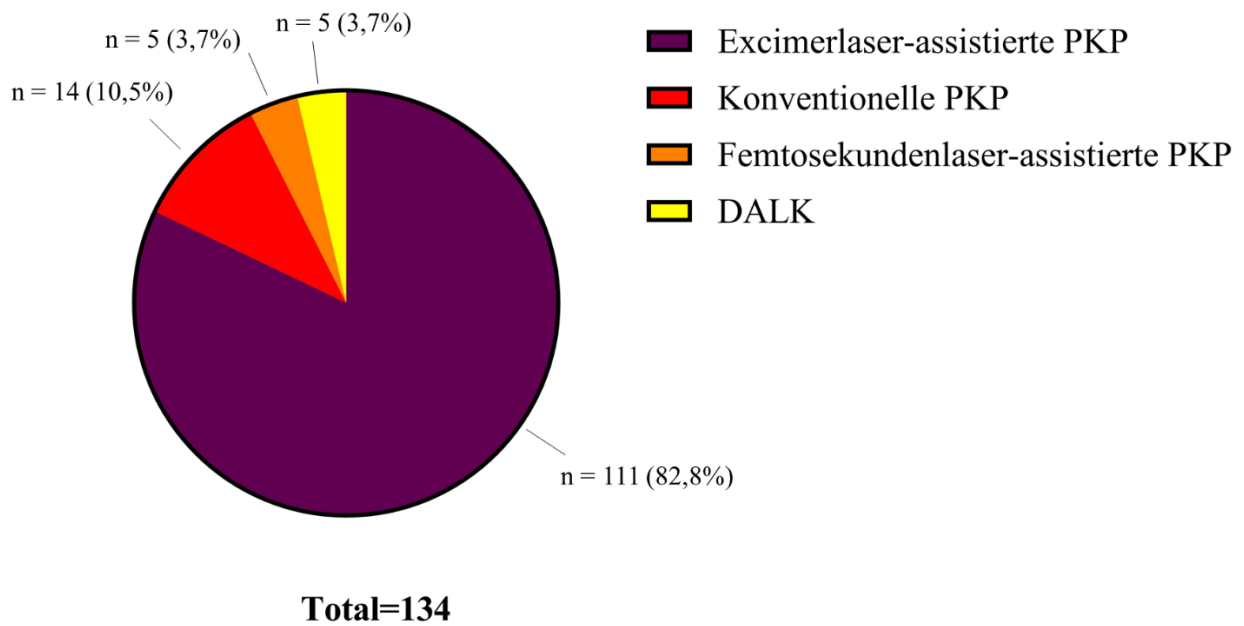
**Tabelle 4:** Übersicht der okulären Komorbiditäten des untersuchten Patientenkollektivs. Unter dem Punkt „Netzhauterkrankung“ wurden der Fundus hypertonicus Grad I und die milde nicht-proliferative diabetische Retinopathie zusammengefasst. Bei allen Patienten mit Glaukom handelte es sich um ein präperimetrisches, primär chronisches Offenwinkelglaukom mit unter Lokalthherapie gut reguliertem intraokularem Druck. Unter dem Punkt „Sonstige“ wurden für die Studie irrelevante Zufallsbefunde wie benigne Aderhaut- oder Irisnävi zusammengefasst.

Die folgende Tabelle gibt eine Übersicht über die demographischen Basisdaten des untersuchten Patientenkollektivs (Tab. 5):

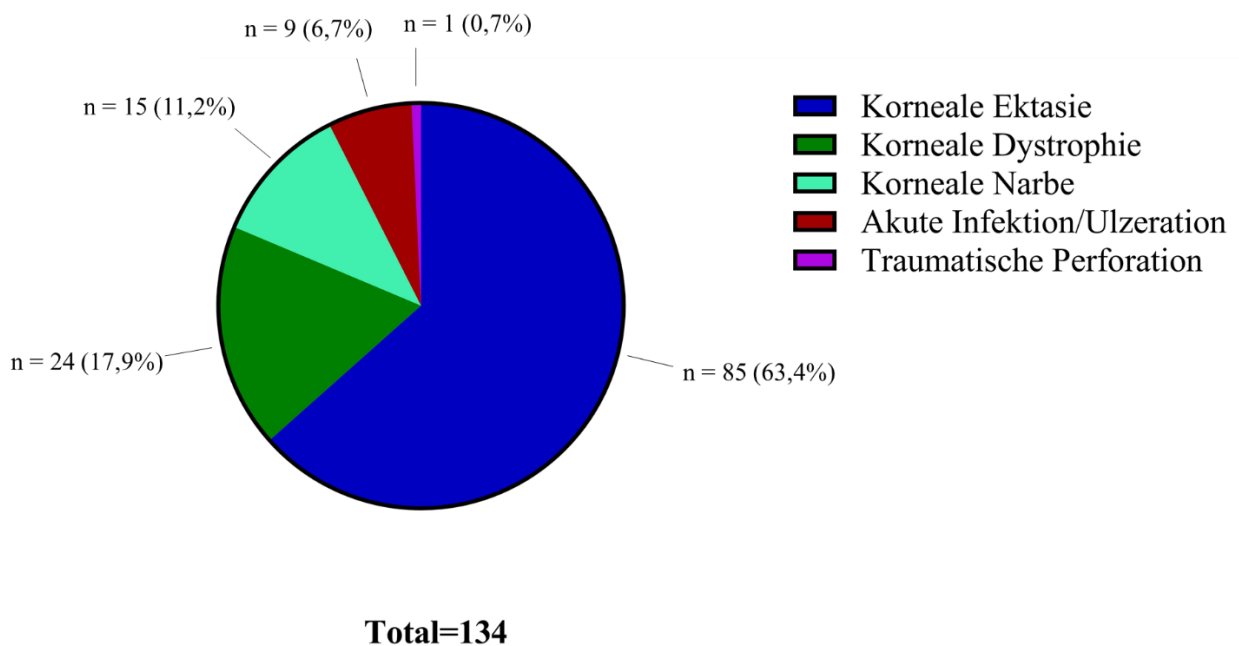
		Absolute Zahl (%) n = 134
Alter (Jahre, Mittel $\pm$ SA)		59,9 $\pm$ 11,5
Geschlecht (männlich / weiblich)		80 (59,7) / 54 (40,3)
Seite (RA / LA)		68 (50,7) / 66 (49,3)
Zeitabstand KPL - IOL (Monate, Mittel $\pm$ SA)		62,3 $\pm$ 80,8 (14 - 388)
Position der IOL (intrakapsulär / sulkusfixiert)		115 (85,8) / 19 (14,2)
Nahttechnik (doppelt fortlaufende Kreuzstichnaht / Einzelknüpfnähte)		111 (82,8) / 8 (6,0)
Art der KPL	Excimerlaser-PKP	111 (82,8)
	Konventionelle PKP	14 (10,5)
	Femtosekundenlaser-PKP	5 (3,7)
	DALK	5 (3,7)
Indikation der KPL	Korneale Ektasie	85 (63,4)
	Korneale Dystrophie	24 (17,9)
	Korneale Narbe	15 (11,2)
	Akute Infektion/Ulzeration	9 (6,7)
	Traumatische Perforation	1 (0,7)
Transplantat-Durchmesser Empfänger/Spender (mm)	7,0/7,1	1 (0,7)
	7,5/7,6	12 (9)
	8,0/8,1	83 (61,9)
	8,5/8,6	36 (26,8)
	9,0/9,5	1 (0,7)
	10,0/10,5	1 (0,7)
Vorheriger post-KPL-Eingriff	Re-KPL	33 (24,6)
	Kompressionsnähte	7 (5,2)
	Limbusparallele Keratotomien	3 (2,2)
	Andere	15 (11,2)
IOL-Modell	Zeiss AT Torbi 709M	48 (35,8)
	Rayner T-Flex 623T	28 (20,8)
	Rayner Sulcoflex Toric 653T	19 (14,2)
	Rayner RayOne Toric RAO610T	16 (11,9)
	Rayner T-Flex 573T	16 (11,9)
	Zeiss AT Torbi 719MP	5 (3,7)
	Rayner Superflex 620H	1 (0,7)
	Alcon AcrySof Toric	1 (0,7)

**Tabelle 5:** Demographische Daten und Basischarakteristika von 134 Augen, die eine torische intrakapsuläre oder Add-On-IOL-Implantation bei hohem Astigmatismus nach vorheriger Keratoplastik erhielten. KPL = Keratoplastik.

Die Variante (Abb. 9) sowie die Indikation der vorangehenden Keratoplastik (Abb. 10) sind in den folgenden Grafiken zusammengefasst:

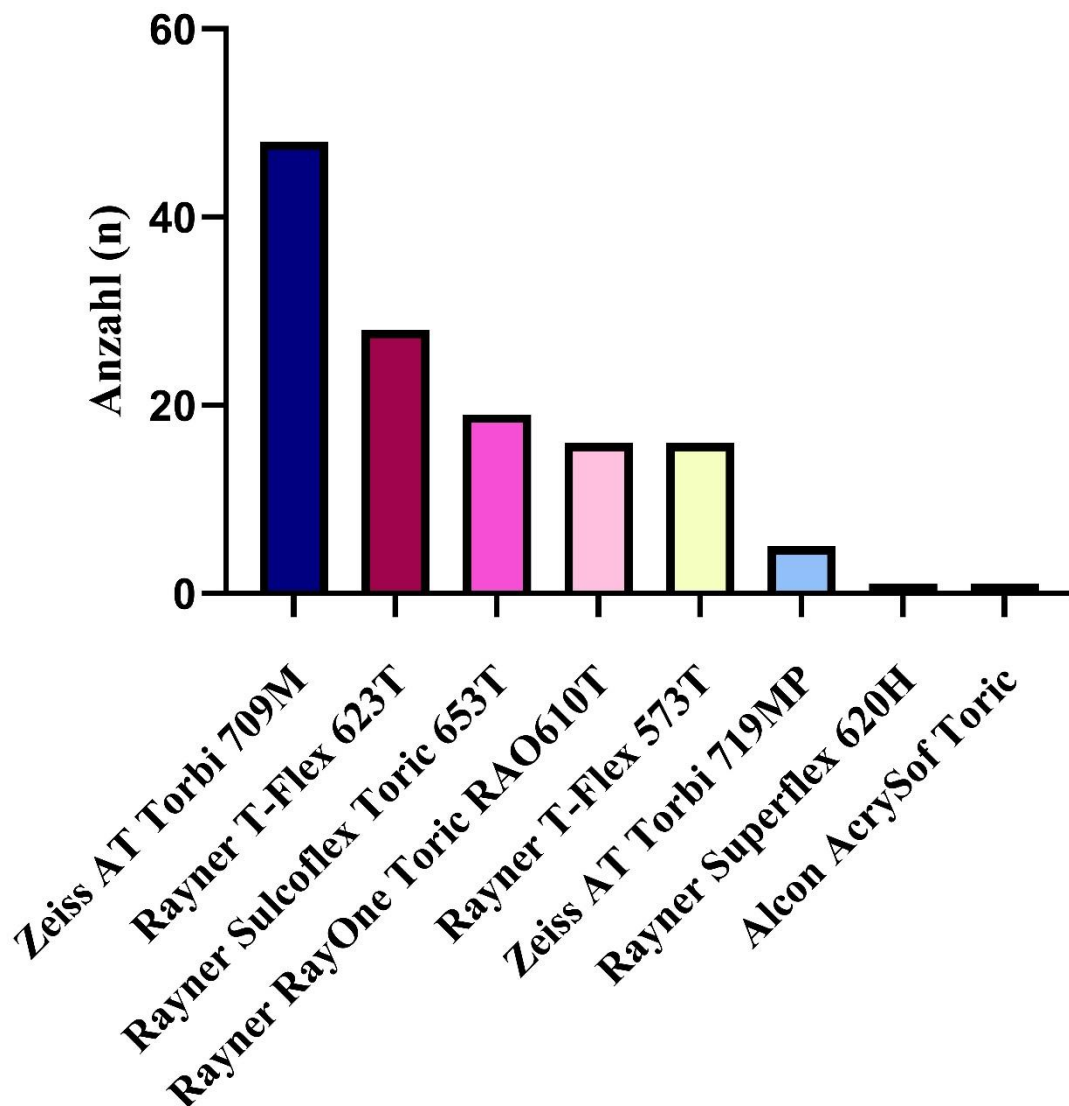


**Abbildung 9:** Arten der jeweils vorangehenden Keratoplastik im untersuchten Patientenkollektiv (PKP = Perforierende Keratoplastik; DALK = tiefe anteriore lamelläre Keratoplastik).



**Abbildung 10:** Indikationen der Keratoplastik im untersuchten Patientenkollektiv.

Die Anzahl der jeweils verwendeten IOL-Modelle ist in der folgenden Grafik zusammengefasst (Abb. 11):



**Abbildung 11:** Modell und Anzahl der implantierten torischen Intraokularlinsen im untersuchten Patientenkollektiv.

### 5.1.2 Biometrie

Die präoperative Biometrie umfasste die Achsenlänge (AL), die Vorderkammertiefe (VKT), die flache (K1) und steile Keratometrie (K2) jeweils in D und in mm, die sphärische (Sph) und zylindrische (Zyl) Stärke der zu implantierenden torischen IOL, die intendierte Achsenlage (AcL) sowie die geplante Inzisionsachse des Hauptzugangsschnittes (IA, entweder superior bei

90° oder temporal bei 0°/180°). Die Daten wurden je nach Implantationsort der torischen IOL (intrakapsulär/Add-on) unterteilt (Tab. 6):

Implantationsort	Intrakapsulär	Add-on
Anzahl	115	19
AL (mm)	24,64 ± 1,81 (20,78 – 31,17)	24,51 ± 1,92 (20,62 – 29,52)
VKT (mm)	3,63 ± 0,51 (2,52 – 4,88)	3,75 ± 0,78 (1,24 – 5,08)
K1 (D)	40,9 ± 2,50 (35,70 – 44,50)	40,94 ± 2,45 (35,94 – 43,95)
K1 (mm)	8,22 ± 0,50 (7,11 – 9,20)	8,26 ± 0,49 (7,68 – 9,39)
K2 (D)	48,35 ± 2,47 (42,25 – 54,52)	49,4 ± 1,91 (45,3 – 52,16)
K2 (mm)	6,94 ± 0,35 (5,98 – 8,00)	6,82 ± 0,27 (6,48 ± 7,45)
Sph (D)	13,75 ± 5,71 (-3,00 – 26,5)	-3,84 ± 4,63 (-10,00 – 4,50)
Zyl (D)	8,44 ± 2,62 (1,00 – 12,00)	5,73 ± 0,55 (4,00 – 6,00)
AcL (°)	86 ± 51,74	65,68 ± 54,54

**Tabelle 6:** Übersicht der präoperativ erhobenen biometrischen Daten des untersuchten Patientenkollektivs (Angabe jeweils als Mittelwert mit Standardabweichung und Minimum – Maximum). Für die intendierte Achsenlage (AcL) wurde auf eine Angabe von Minimum und Maximum verzichtet, da es sich um eine Orientierung in Grad handelt.

Die IA lag für die intrakapsulären IOL bei 57 (49%) Augen superior und bei 58 (51%) Augen temporal. Bei Add-on-Implantation lag die Inzisionsachse bei einem Auge (5%) superior und bei 18 Augen (95%) temporal.

### 5.1.3 Korneale Topographie

Die präoperative Untersuchung mittels TMS-5 umfasste die flache und steile Keratometrie (Kf, Ks), den kornealen Zylinder (Cyl), den Regularitätsindex der Hornhautoberfläche („surface regularity index“, SRI) und den Asymmetrie-Index der Hornhautoberfläche („surface asymmetry index“, SAI). Die Daten wurden je nach Implantationsort (intrakapsulär/Add-on) unterteilt (Tab. 7):

Implantationsort	Intrakapsulär	Add-on
Anzahl	115	19
Kf (D)	41,38 ± 2,51 (36,03 – 47,76)	40,66 ± 2,83 (34,02 – 45,07)
Ks (D)	48,76 ± 2,43 (44,14 – 57,14)	49,58 ± 1,97 (45,71 – 52,35)
Cyl (D)	7,27 ± 2,73 (0,86 – 14,66)	8,92 ± 3,12 (2,23 – 12,63)
SRI	1,07 ± 0,34 (0,37 – 1,89)	1,17 ± 0,33 (0,33 – 1,65)
SAI	1,02 ± 0,69 (0,39 – 2,62)	0,85 ± 0,42 (0,42 – 2,08)

**Tabelle 7:** Übersicht der präoperativ erhobenen TMS-5-Daten des untersuchten Patientenkollektivs (Angabe jeweils als Mittelwert mit SA und Minimum – Maximum).

Auf eine Analyse der Entwicklung der mittels TMS-5 erhobenen Daten wurde bei unzureichender postoperativer Datenmenge verzichtet.

## 5.2 Scheimpflugtomographie

Die Scheimpflugtomographie mittels Pentacam wurde präoperativ sowie 6 Wochen und 10 Monate postoperativ durchgeführt. Die erhobenen Parameter umfassten: die flache, steile und mittlere Keratometrie der Vorderfläche (aK1, aK2, aKmean) und der Hinterfläche (pK1, pK2, pKmean), den anterioren und posterioren kornealen Astigmatismus (ACA, PCA), die anteriore und posteriore Achse des steilen Krümmungsmeridians, die kornealen Unregelmäßigkeiten (U), die Regularität des zentralen und peripheren Astigmatismus (RzA, RpA), die Koma bei 0° und 90° (Koma0, Koma90), den summierten Wellenfrontfehler der Hornhaut („root mean square“, RMSgesamt), den Anteil der niedriggradigen und höhergradigen Abbildungsfehler („root mean square of lower order aberrations“, RMSLOA, „root mean square of higher order aberrations“, RMSHOA), die interne und externe Vorderkammertiefe (VKTi, VKTe) sowie die Pachymetrie zentral (P0) und im 2-8 mm-Radius (P2, P4, P6, P8).

Keratometrisch zeigten sich weder in G1 noch in G2 statistisch signifikante Veränderungen von aK1, aK2, aKmean, pK1, pK2 oder pKmean zwischen präoperativen und postoperativen Messungen. Die mit der Pentacam erhobenen keratometrischen Ergebnisse beider Gruppen sind in der folgenden Tabelle zusammengefasst (Tab. 8):

	Intrakapsulär					Add-on				
	Präoperativ	6 Wochen	<i>P</i>	10 Monate	<i>P</i>	Präoperativ	6 Wochen	<i>P</i>	10 Monate	<i>P</i>
aK1 (D)	41,81 ± 2,51	41,83 ± 2,55	0,45	42,19 ± 2,47	1,0	41,17 ± 2,92	41,52 ± 2,91	1,0	42,04 ± 3,54	1,0
aK2 (D)	48,73 ± 2,69	48,62 ± 2,51	0,55	48,93 ± 2,42	1,0	49,95 ± 1,92	48,87 ± 1,93	0,80	49,07 ± 2,13	0,96
aKmean (D)	44,94 ± 2,05	44,92 ± 2,14	0,51	45,27 ± 2,02	0,81	45,1 ± 2,22	44,85 ± 2,19	1,0	45,20 ± 2,35	1,0
pK1 (D)	-5,99 ± 0,42	-6,09 ± 0,45	0,52	-6,04 ± 0,45	1,0	-5,81 ± 0,46	-5,92 ± 0,51	1,0	-5,87 ± 0,53	1,0
pK2 (D)	-7,08 ± 0,54	-7,14 ± 0,56	1,0	-7,13 ± 0,53	1,0	-7,33 ± 0,41	-7,19 ± 0,3	1,0	-7,27 ± 0,28	1,0
pKmean (D)	-6,48 ± 0,32	-6,54 ± 0,32	0,65	-6,54 ± 0,35	0,63	-6,46 ± 0,33	-6,47 ± 0,32	1,0	-6,47 ± 0,29	1,0

**Tabelle 8:** Entwicklung der mit der Pentacam gemessenen Keratometrie der Hornhautvorder- und -rückfläche nach Implantation torischer Intraokularlinsen bei Augen nach vorangehender perforierender oder tiefer anterior lamellierender Keratoplastik (Angabe jeweils als Mittelwert mit SA).

Der korneale Astigmatismus der Vorder- und -rückfläche nahm in beiden Gruppen nach Implantation der torischen IOL nicht signifikant ab (Tab. 9). Der PCA zeigte in G2 jedoch eine Tendenz in Richtung Signifikanz im Vergleich zwischen präoperativem Wert und letztem Follow-Up ( $P = 0,23$ ).

	Intrakapsulär					Add-on				
	Präoperativ	6 Wochen	<i>P</i>	10 Monate	<i>P</i>	Präoperativ	6 Wochen	<i>P</i>	10 Monate	<i>P</i>
ACA (D)	7,16 ± 2,7	6,81 ± 2,83	1,0	6,73 ± 2,86	0,84	8,78 ± 2,73	7,35 ± 2,71	0,57	7,02 ± 3,91	0,23
PCA (D)	1,18 ± 0,53	1,19 ± 0,54	1,0	1,15 ± 0,51	1,0	1,54 ± 0,62	1,23 ± 0,61	0,418	1,44 ± 0,61	1,0

**Tabelle 9:** Entwicklung des mit der Pentacam gemessenen Vorder- und Rückflächenastigmatismus nach Implantation torischer Intraokularlinsen bei Augen nach vorangehender perforierender oder tiefer anterior lamellierender Keratoplastik (Angabe jeweils als Mittelwert mit SA).

Das Verhältnis von TCRA/MRA lag in G1 bei  $1,02 \pm 0,4$  (0,6 – 3,1) und in G2 bei  $1,02 \pm 0,24$  (0,67 – 1,49). Die mittlere präoperative Differenz zwischen topographisch und manifest refraktiv gemessener Astigmatismusachse lag in G1 bei  $7,1 \pm 5,9^\circ$  (0 – 26) und in G2 bei  $6,7 \pm 5,2^\circ$  (0,6 – 24).

Die Untersuchung der kornealen Aberrometrie ergab in beiden Gruppen keine signifikanten Unterschiede zwischen prä- und postoperativ. Die Ergebnisse sind in der folgenden Tabelle zusammengefasst (Tab. 10):

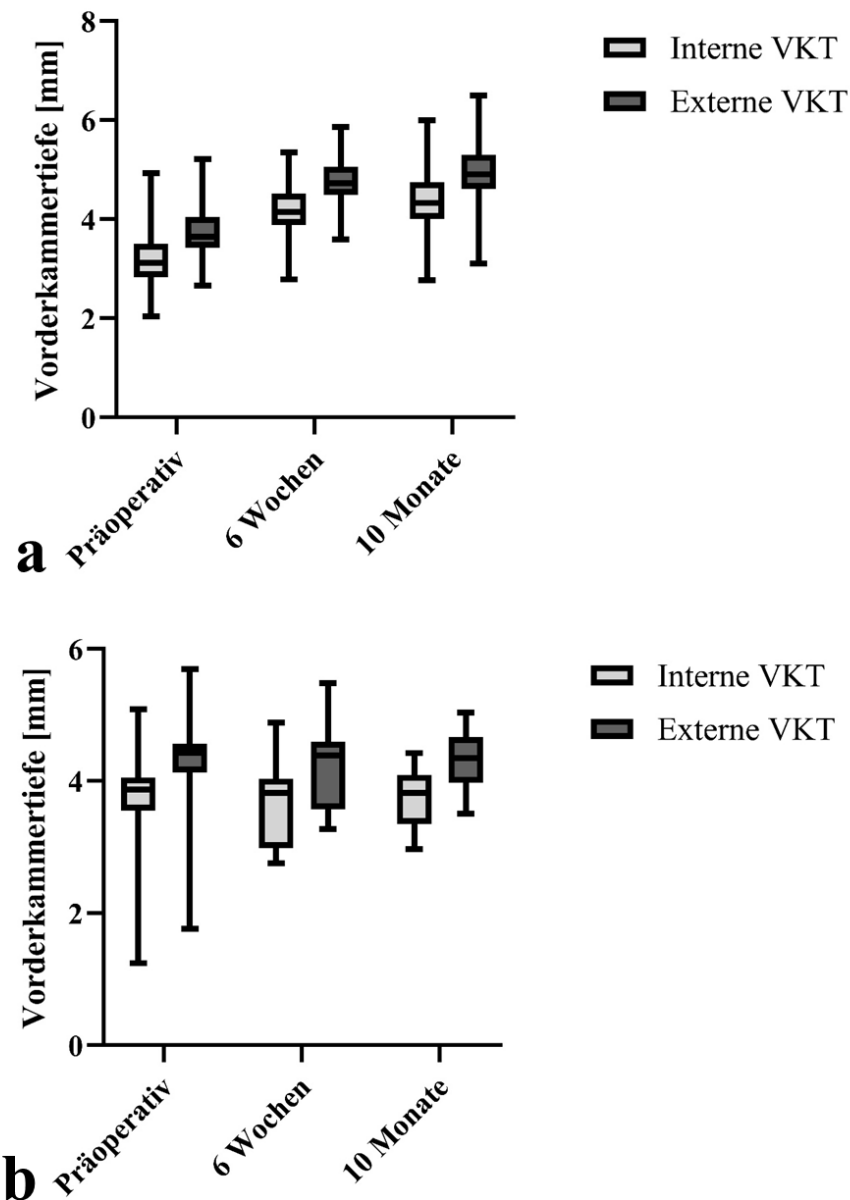
	Intrakapsulär					Add-on				
	Präoperativ	6 Wochen	P	10 Monate	P	Präoperativ	6 Wochen	P	10 Monate	P
U	$0,12 \pm 0,04$	$0,12 \pm 0,04$	1,0	$0,11 \pm 0,04$	0,508	$0,14 \pm 0,02$	$0,15 \pm 0,07$	1,0	$0,14 \pm 0,05$	1,0
RzA	$0,58 \pm 0,23$	$0,54 \pm 0,25$	0,754	$0,53 \pm 0,24$	0,574	$0,72 \pm 0,26$	$0,61 \pm 0,23$	0,618	$0,61 \pm 0,33$	0,44
RpA	$0,34 \pm 0,16$	$0,32 \pm 0,15$	1,0	$0,32 \pm 0,16$	1,0	$0,39 \pm 0,13$	$0,37 \pm 0,13$	1,0	$0,36 \pm 0,14$	1,0
Koma0	$0,02 \pm 1,27$	$0,09 \pm 1,49$	1,0	$0,06 \pm 1,59$	1,0	$-0,39 \pm 1,11$	$0,07 \pm 1,15$	1,0	$-0,34 \pm 1,15$	1,0
Koma90	$0,08 \pm 1,25$	$0,19 \pm 1,15$	1,0	$0,26 \pm 1,38$	1,0	$0,31 \pm 1,85$	$0,36 \pm 1,27$	1,0	$0,77 \pm 2,22$	1,0
RMSgesamt	$188,49 \pm 11,87$	$188,76 \pm 13,55$	1,0	$191,14 \pm 13,66$	0,462	$192,86 \pm 14,67$	$190,48 \pm 14,81$	1,0	$193,86 \pm 13,27$	1,0
RMSLOA	$188,28 \pm 11,65$	$188,53 \pm 13,38$	1,0	$190,88 \pm 13,38$	0,455	$192,6 \pm 14,46$	$190,25 \pm 14,64$	1,0	$193,47 \pm 12,94$	1,0
RMSHOA	$8,32 \pm 4,24$	$8,64 \pm 4,23$	1,0	$8,99 \pm 4,69$	0,84	$9,42 \pm 4,34$	$8,81 \pm 3,79$	1,0	$11,27 \pm 5,64$	0,7

**Tabelle 10:** Entwicklung der mit der Pentacam gemessenen Aberrometrie nach Implantation torischer Intraokularlinsen bei Augen nach vorangehender perforierender oder tiefer anterior lamellierender Keratoplastik (Angabe jeweils als Mittelwert mit SA).

Die mittlere präoperative WFA HORMS betrug in G1  $0,6 \pm 0,3 \mu\text{m}$  (0,2 – 2,4) und in G2  $0,8 \pm 0,3 \mu\text{m}$  (0,3 – 1,5).

Die interne Vorderkammertiefe (VKTi = Abstand von Endothel bis Linsenvorderfläche) in G1 stieg von  $3,17 \pm 0,49$  mm präoperativ auf  $4,18 \pm 0,52$  mm nach 6 Wochen ( $P < 0,001$ ) und auf  $4,36 \pm 0,53$  mm nach 10 Monaten ( $P < 0,001$ , Abb. 12). Die externe Vorderkammertiefe (VKTe = Abstand von Epithel bis Linsenvorderfläche) in G1 stieg von  $3,69 \pm 0,46$  mm präoperativ auf

4,76 ± 0,47 mm nach 6 Monaten (P < 0,001) und auf 4,94 ± 0,49 mm nach 10 Monaten (P < 0,001). Die VKTi in G2 sank von 3,75 ± 0,78 mm präoperativ auf 3,68 ± 0,59 mm nach 6 Wochen (P = 0,3) und stieg erneut auf 3,72 ± 0,41 mm nach 10 Monaten an (P = 0,173). Die VKTe in G2 sank von 4,29 ± 0,78 mm präoperativ auf 4,24 ± 0,58 mm nach 6 Wochen (P = 0,57) und stieg erneut auf 4,29 ± 0,41 mm nach 10 Monaten an (P = 0,185).



**Abbildung 12:** Entwicklung der internen und externen Vorderkammertiefe vor und 6 Wochen sowie 10 Monate nach Implantation einer torischen intrakapsulären (a) oder sulkus-fixierten Add-on-IOL (b) zur Behandlung eines hohen Astigmatismus nach Keratoplastik.

Die Pachymetrie im 2- und im 6-mm-Radius in G1 nahm 6 Wochen nach der tIOL-Implantation signifikant zu (Tab. 11). Abgesehen davon zeigten sich in beiden Gruppen keine signifikanten Veränderungen der Pachymetrie.

	Intrakapsulär					Add-on				
	Präoperativ	6 Wochen	<i>P</i>	10 Monate	<i>P</i>	Präoperativ	6 Wochen	<i>P</i>	10 Monate	<i>P</i>
P0 ( $\mu\text{m}$ )	538 $\pm$ 39	554 $\pm$ 56	0,06	548 $\pm$ 46	0,37	550 $\pm$ 35	550 $\pm$ 30	1,0	550 $\pm$ 49	1,0
P2 ( $\mu\text{m}$ )	553 $\pm$ 39	570 $\pm$ 58	0,04*	564 $\pm$ 48	0,26	565 $\pm$ 36	565 $\pm$ 35	1,0	568 $\pm$ 48	1,0
P4 ( $\mu\text{m}$ )	588 $\pm$ 41	608 $\pm$ 63	0,05	602 $\pm$ 59	0,19	595 $\pm$ 41	599 $\pm$ 48	1,0	606 $\pm$ 62	1,0
P6 ( $\mu\text{m}$ )	639 $\pm$ 47	667 $\pm$ 57	0,008*	658 $\pm$ 75	0,08	653 $\pm$ 52	663 $\pm$ 67	1,0	662 $\pm$ 70	1,0
P8 ( $\mu\text{m}$ )	723 $\pm$ 56	748 $\pm$ 81	0,10	745 $\pm$ 66	0,15	758 $\pm$ 61	747 $\pm$ 59	1,0	746 $\pm$ 77	1,0

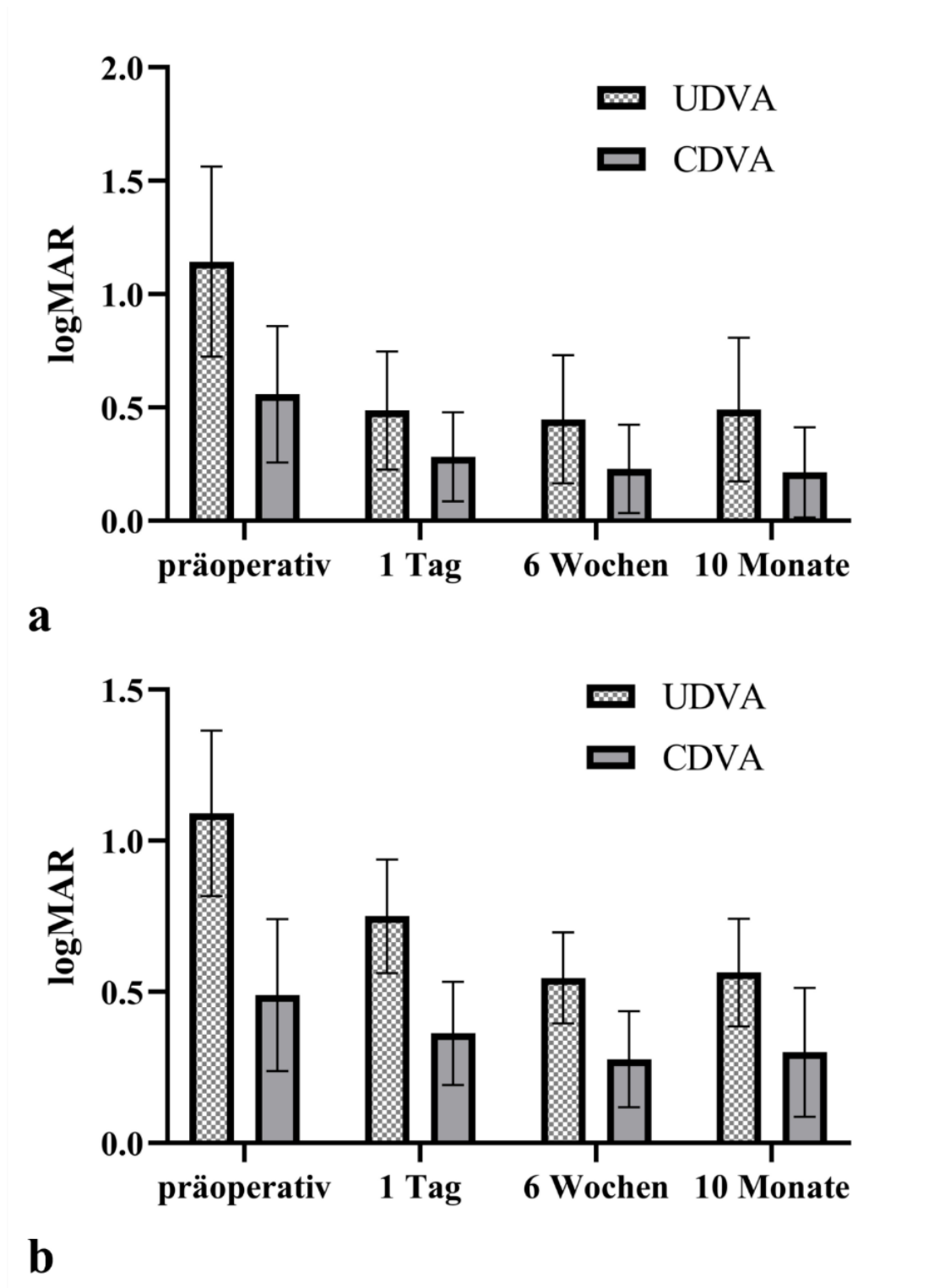
**Tabelle 11:** Entwicklung der Pachymetrie zentral (P0) sowie im 2-, 4-, 6- und 8-mm-Radius (P2 - P8) 6 Wochen und 10 Monate nach Implantation einer torischen IOL bei Augen mit vorangehender perforierender oder tiefer anterior lamellierender Keratoplastik. \* = statistisch signifikant.

### 5.3 Visus

Die unkorrigierte Distanzsehschärfe („uncorrected distance visual acuity“, UDVA in logMAR) in G1 verbesserte sich von  $1,16 \pm 0,47$  präoperativ auf  $0,48 \pm 0,26$  am ersten postoperativen Tag, auf  $0,43 \pm 0,27$  nach 6 Wochen und auf  $0,50 \pm 0,37$  nach 10 Monaten (alle  $P < 0,001$ , Abb. 13). Die korrigierte Distanzsehschärfe („corrected distance visual acuity“, CDVA in logMAR) in G1 verbesserte sich von  $0,55 \pm 0,30$  präoperativ auf  $0,28 \pm 0,19$  am ersten postoperativen Tag, auf  $0,22 \pm 0,19$  nach 6 Wochen und auf  $0,21 \pm 0,19$  nach 10 Monaten (alle  $P < 0,001$ ).

Die UDVA in G2 verbesserte sich von  $1,1 \pm 0,26$  präoperativ auf  $0,75 \pm 0,18$  am ersten postoperativen Tag, auf  $0,54 \pm 0,14$  nach 6 Wochen und auf  $0,56 \pm 0,17$  nach 10 Monaten (alle  $P < 0,001$ ). Die CDVA in G2 verbesserte sich von  $0,49 \pm 0,24$  präoperativ auf  $0,36 \pm 0,16$  ( $P = 0,017$ ) am ersten postoperativen Tag, auf  $0,27 \pm 0,15$  nach 6 Wochen ( $P < 0,001$ ) und auf  $0,3 \pm 0,2$  nach 10 Monaten ( $P < 0,001$ ).

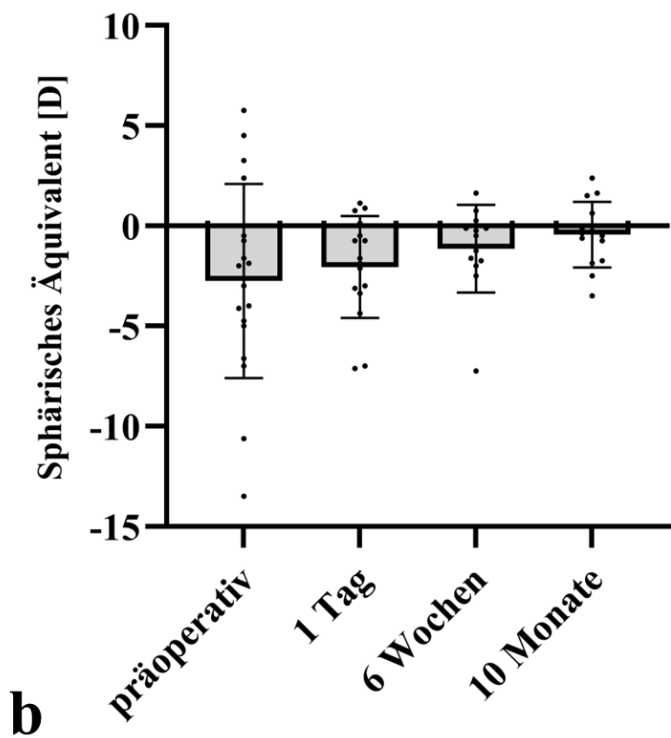
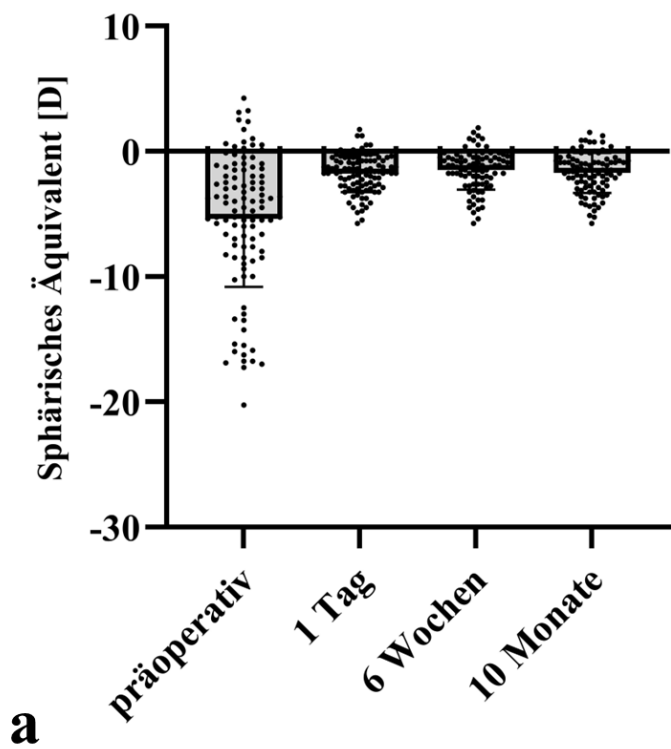
Zehn Monate nach torischer IOL-Implantation war die CDVA in G1 signifikant höher als in G2 ( $P = 0,034$ ). Zum letzten Follow-Up-Zeitpunkt hatten 94 von 103 Augen (91%) in G1 und 13 von 18 Augen (72%) in G2 eine CDVA von  $\geq 20/40$  nach Snellen. Bezüglich CDVA hatten 80 Augen (77%) in G1 und 12 Augen (63%) in G2 nach 10 Monaten  $\geq 2$  Visuszeilen nach Snellen hinzugewonnen.



**Abbildung 13:** Entwicklung des unkorrigierten (UDVA) und bestkorrigierten Distanzvisus (CDVA) vor und einen Tag, 6 Wochen sowie 10 Monate nach Implantation einer torischen intrakapsulären (a) oder sulkus-fixierten Add-on-IOL (b) zur Behandlung eines hohen Astigmatismus nach perforierender oder tiefer anterior lamellierender Keratoplastik. Die Fehlerbalken repräsentieren jeweils eine SA.

## 5.4 Sphärisches Äquivalent

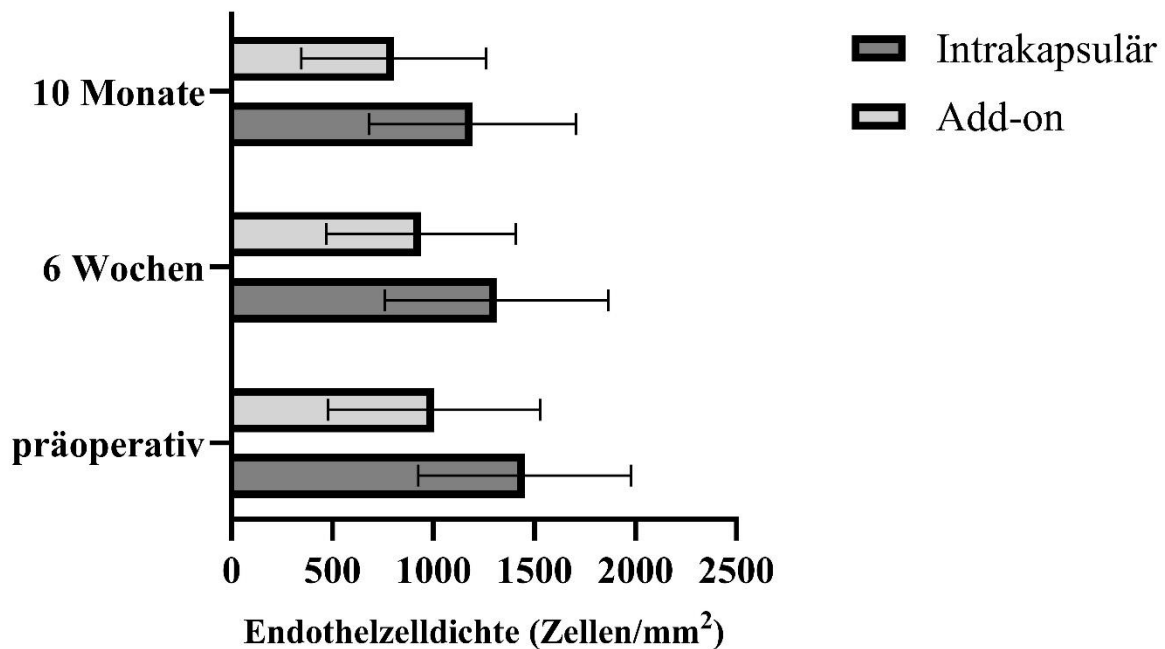
Das mittlere sphärische Äquivalent (SÄ) in G1 verringerte sich signifikant von präoperativ  $-5,39 \pm 5,38$  D auf  $-1,77 \pm 1,47$  D am ersten postoperativen Tag, auf  $-1,50 \pm 1,55$  D nach 6 Wochen und auf  $-1,72 \pm 1,59$  D nach 10 Monaten (alle  $P < 0,001$ , Abb. 14). Das SÄ in G2 verringerte sich von  $-2,71 \pm 4,71$  D präoperativ auf  $-2,04 \pm 2,45$  D am ersten postoperativen Tag ( $P = 0,73$ ), auf  $-1,13 \pm 2,09$  D nach 6 Wochen ( $P = 0,608$ ) und auf  $-0,43 \pm 1,57$  D nach 10 Monaten ( $P = 0,394$ ). Zum Zeitpunkt des letzten Follow-up lagen 89 von 103 Augen (86%) in G1 und 14 von 18 Augen (77%) in G2 innerhalb von  $\pm 1,0$  D des vorhergesagten postoperativen SÄ. Eine signifikante Veränderung des SÄ ab 6 Wochen postoperativ bis zum letzten Follow-Up gab es in beiden Gruppen nicht.



**Abbildung 14:** Entwicklung des refraktiven sphärischen Äquivalents vor und einen Tag, 6 Wochen sowie 10 Monate nach Implantation einer torischen intrakapsulären (a) oder sulcusfixierten Add-on IOL (b) zur Behandlung eines hohen Astigmatismus nach perforierender oder tiefer anterior lamellierender Keratoplastik. Die Fehlerbalken repräsentieren jeweils eine SA.

## 5.5 Endothelzellzahl

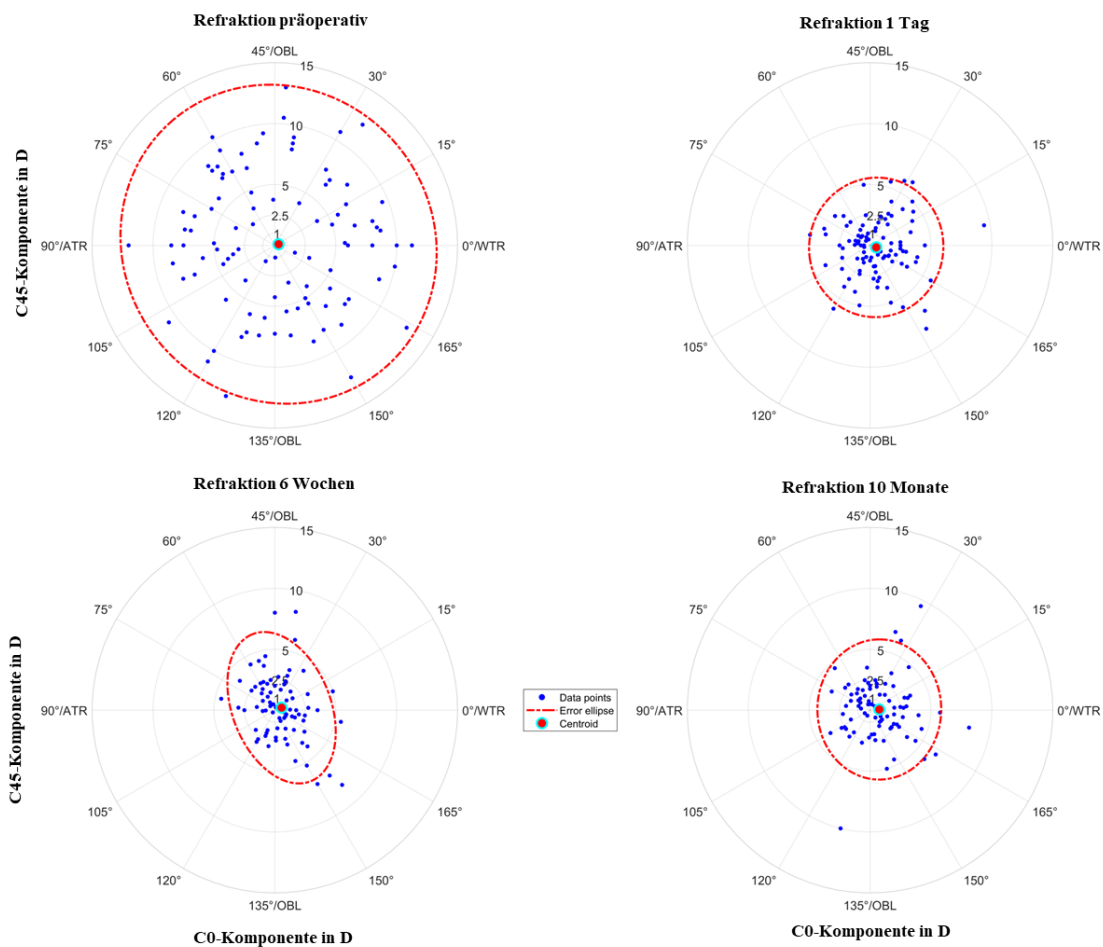
Die mittlere Endothelzellzahl in G1 verringerte sich signifikant von  $1452 \pm 525$  c/mm<sup>2</sup> präoperativ auf  $1313 \pm 549$  c/mm<sup>2</sup> nach 6 Wochen ( $P = 0,0019$ ) und auf  $1195 \pm 509$  nach 10 Monaten ( $P < 0,001$ , Abb. 15). In G2 reduzierte sich die mittlere Endothelzellzahl nicht signifikant von präoperativ  $1003 \pm 509$  c/mm<sup>2</sup> auf  $939 \pm 445$  c/mm<sup>2</sup> nach 6 Wochen ( $P = 0,414$ ) und auf  $804 \pm 441$  c/mm<sup>2</sup> nach 10 Monaten ( $P = 0,055$ ). Die Veränderung der Endothelzelldichte in G1 zwischen 6 Wochen und 10 Monaten postoperativ war signifikant ( $P < 0,001$ ), die Veränderung in G2 nicht ( $P = 0,64$ ).



**Abbildung 15:** Entwicklung der kornealen Endothelzelldichte vor und 6 Wochen sowie 10 Monate nach Implantation einer intrakapsulären oder sulkus-fixierten Add-on-IOL zur Behandlung eines hohen Astigmatismus nach perforierender oder tiefer anterior lamellierender Keratoplastik. Die Fehlerbalken repräsentieren jeweils eine SA.

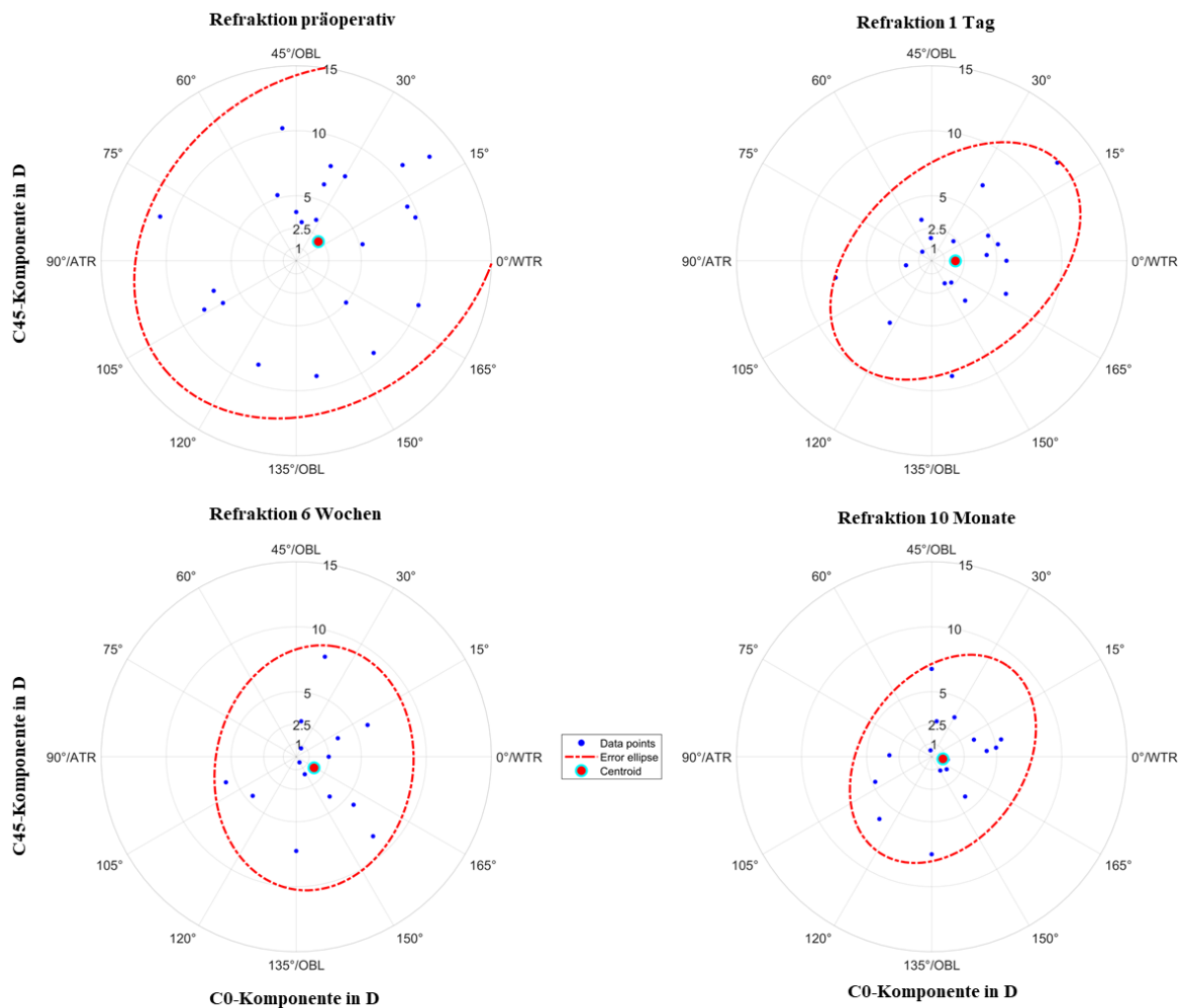
## 5.6 Vektoranalyse

Die Vektoranalyse in G1 zeigte eine signifikante Reduktion des manifesten refraktiven Astigmatismus zu allen 3 postoperativen Zeitpunkten (Abb. 16). Die AR der 95%-Konfidenzellipse lag bei 1,04 nach 10 Monaten. Die Fläche der Konfidenzellipse sank in G1 von 533 D<sup>2</sup> präoperativ auf 99 D<sup>2</sup> nach 10 Monaten. Die MHA der 95%-Konfidenzellipse sank von 13,3 D bei 130° präoperativ auf 5,7 D bei 90° nach 10 Monaten.



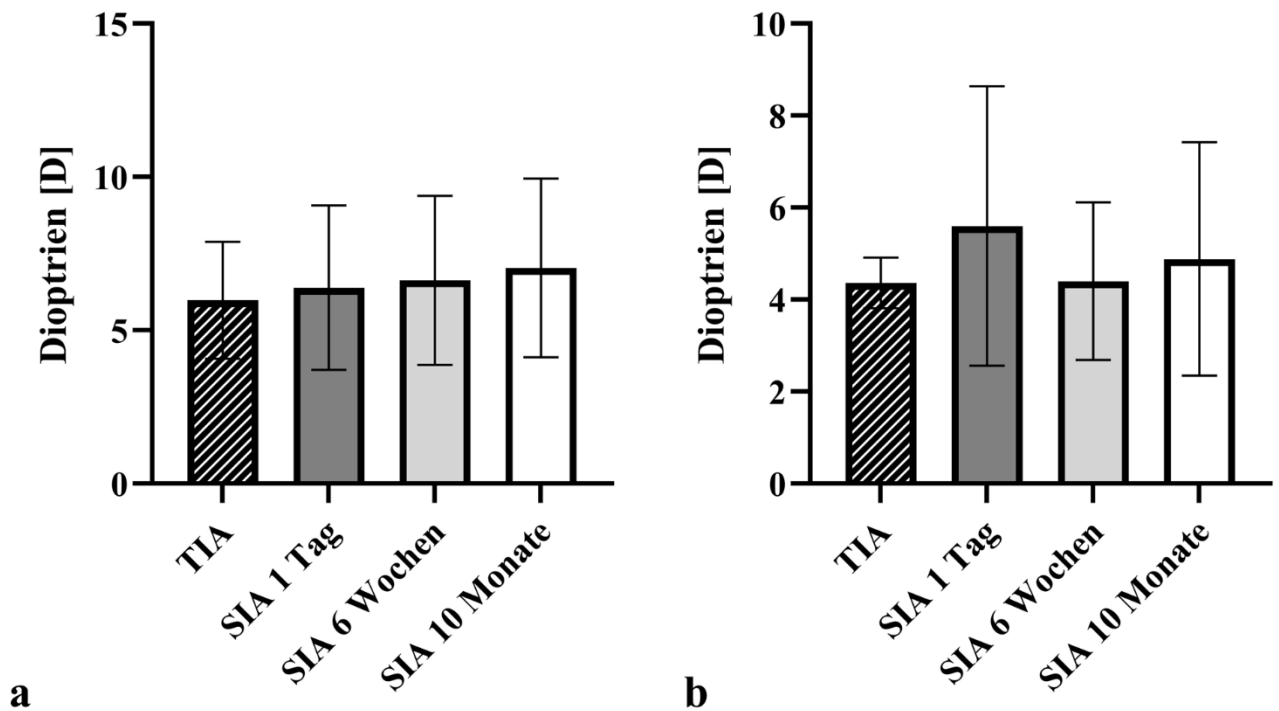
**Abbildung 16:** Double-Angle-Plots des präoperativen kornealen und postoperativen refraktiven Astigmatismus vor sowie einen Tag, 6 Wochen und 10 Monate nach Implantation einer intrakapsulären torischen IOL bei vorangehender perforierender oder tiefer anterior lamellierender Keratoplastik. Die postoperative Reduktion des refraktiven Astigmatismus wird durch den wesentlich kleineren Durchmesser der Fehlerellipse (gestrichelte rote Linie) verdeutlicht. Vom Zentrum nach außen symbolisieren Ringe jeweils 1; 2,5; 5; 10; 15 Dioptrien Astigmatismus.

In G2 lag die AR zum letzten Follow-Up bei 1,51 (Abb. 17). Die Fläche der Konfidenzellipse sank von 589 D<sup>2</sup> präoperativ auf 253 D<sup>2</sup> nach 10 Monaten. Die große Halbachse der 95%-Konfidenzellipse sank von 15,3 D bei 40 ° präoperativ auf 9,4 D bei 50 ° nach 10 Monaten.



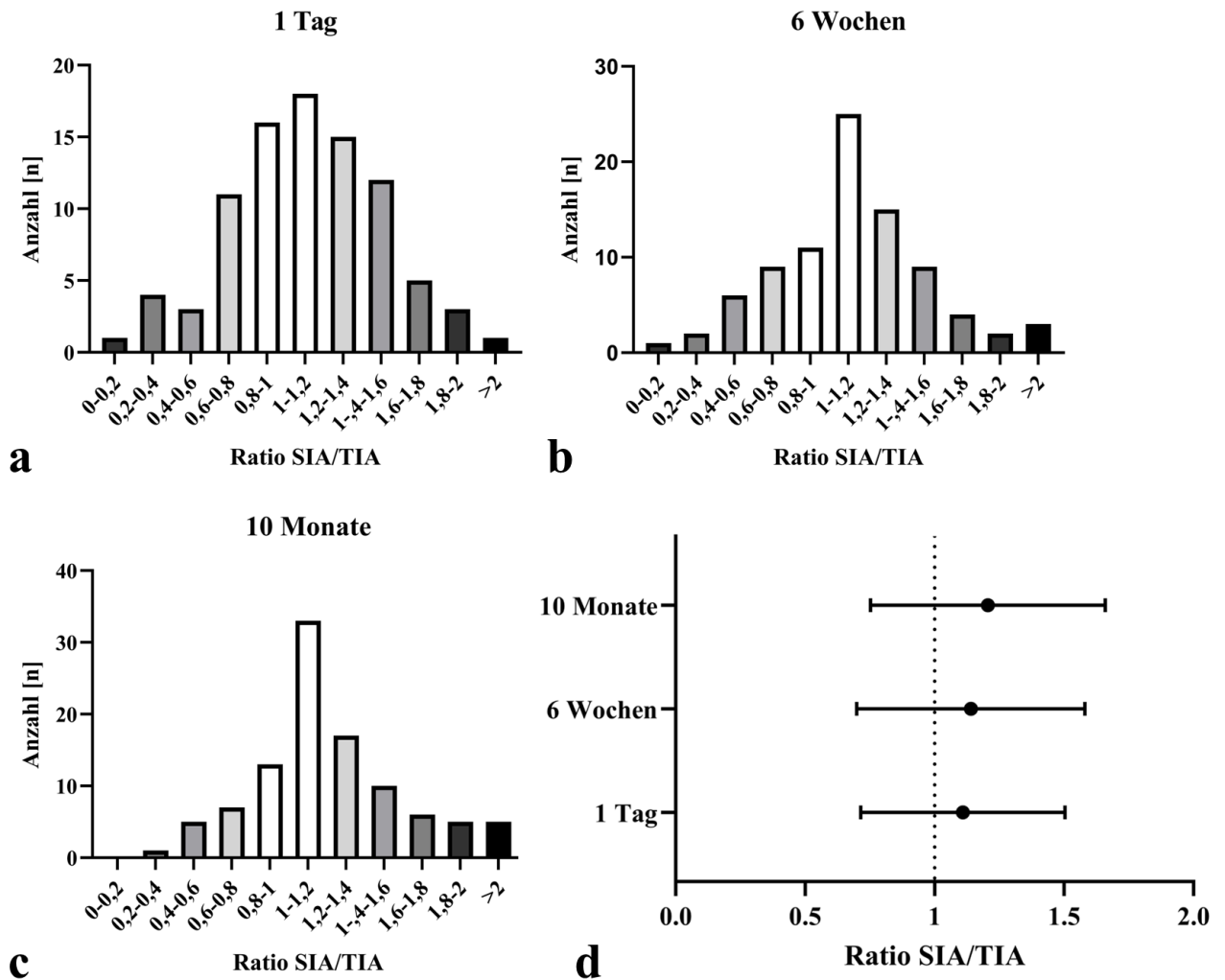
**Abbildung 17:** Double-Angle-Plots des präoperativen kornealen und postoperativen refraktiven Astigmatismus vor und einen Tag, 6 Wochen und 10 Monate nach Implantation einer sulcus-fixierten torischen Add-On-IOL bei Augen mit vorangehender Keratoplastik. Die Fehlerellipse (gestrichelte rote Linie) zeigte sich zum letztem Follow-Up deutlich verkleinert. Vom Zentrum nach außen symbolisieren Ringe jeweils 1; 2,5; 5; 10; 15 Dioptrien Astigmatismus.

Der mittlere Zielastigmatismus (TIA) in G1 lag bei  $5,97 \pm 1,9$  D (Abb. 18). Der tatsächlich chirurgisch induzierte Astigmatismus (SIA) in G1 lag zum letzten Follow-Up bei  $6,69 \pm 2,95$  D. Der mittlere Zielastigmatismus (TIA) in G2 lag bei  $4,35 \pm 0,55$  D. Der tatsächlich chirurgisch induzierte Astigmatismus (SIA) in G2 lag zum letzten Follow-Up bei  $4,88 \pm 2,53$  D.



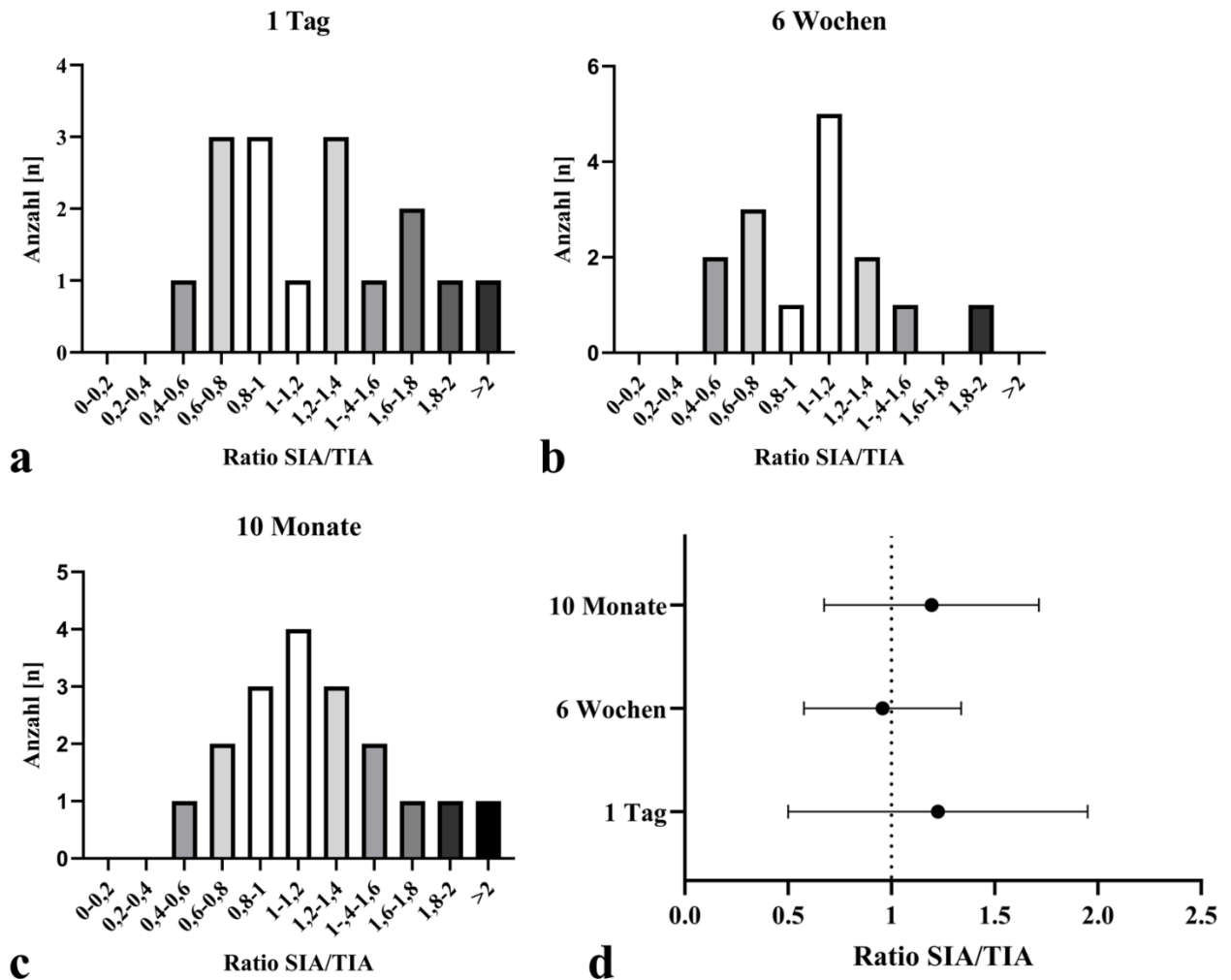
**Abbildung 18:** Höhe des mittleren Zielastigmatismus (TIA) und der mittleren chirurgisch bewirkten refraktiven Astigmatismusänderung (SIA) einen Tag, 6 Wochen und 10 Monate nach Implantation einer intrakapsulären torischen IOL (a) bzw. einer sulcus-fixierten torischen Add-on-IOL (b) zur Behandlung eines hohen Astigmatismus nach perforierender oder tiefer anterior lamellierender Keratoplastik. Die Fehlerbalken repräsentieren jeweils eine Standardabweichung.

Der mittlere astigmatische Korrekturindex (CI) in G1 betrug nach 10 Monaten  $1,2 \pm 0,45$ , was auf eine Tendenz zur Überkorrektur hinweist (Abb. 19).



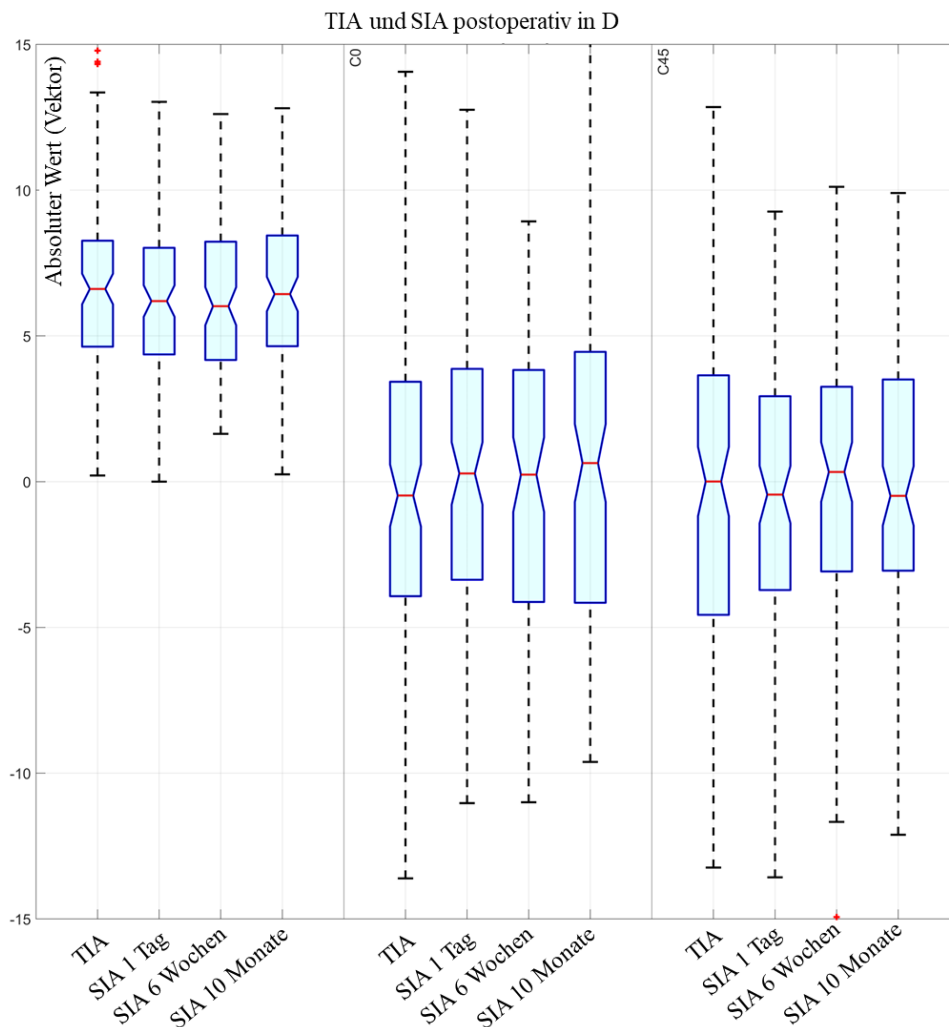
**Abbildung 19:** Höhe des astigmatischen Korrekturindex (CI = Ratio SIA/TIA) einen Tag (a), 6 Wochen (b) und 10 Monate (c) nach Implantation einer intrakapsulären torischen IOL bei moderatem bis sehr hohem Astigmatismus nach perforierender oder tiefer anterior lamellierender Keratoplastik. Der Mittelwert des CI ist für alle postoperativen Zeitpunkte dargestellt (d). Ein Wert von 1 repräsentiert die vollständige gewünschte astigmatische Korrektur. Die Fehlerbalken repräsentieren jeweils eine Standardabweichung.

Der mittlere astigmatische Korrekturindex (CI) in G2 betrug nach 10 Monaten  $1,19 \pm 0,52$ , was ebenfalls auf eine Tendenz zur Überkorrektur hinweist (Abb. 20).



**Abbildung 20:** Höhe des astigmatischen Korrekturindex (CI = Ratio SIA/TIA) einen Tag (a), 6 Wochen (b) und 10 Monate (c) nach Implantation einer sulkus-fixierten torischen Add-on-IOL bei moderatem bis sehr hohem Astigmatismus nach perforierender oder tiefer anterior lamellierender Keratoplastik. Der Mittelwert des CI ist für alle postoperativen Zeitpunkte dargestellt (d). Ein Wert von 1 repräsentiert die vollständige gewünschte astigmatische Korrektur. Die Fehlerbalken repräsentieren jeweils eine Standardabweichung.

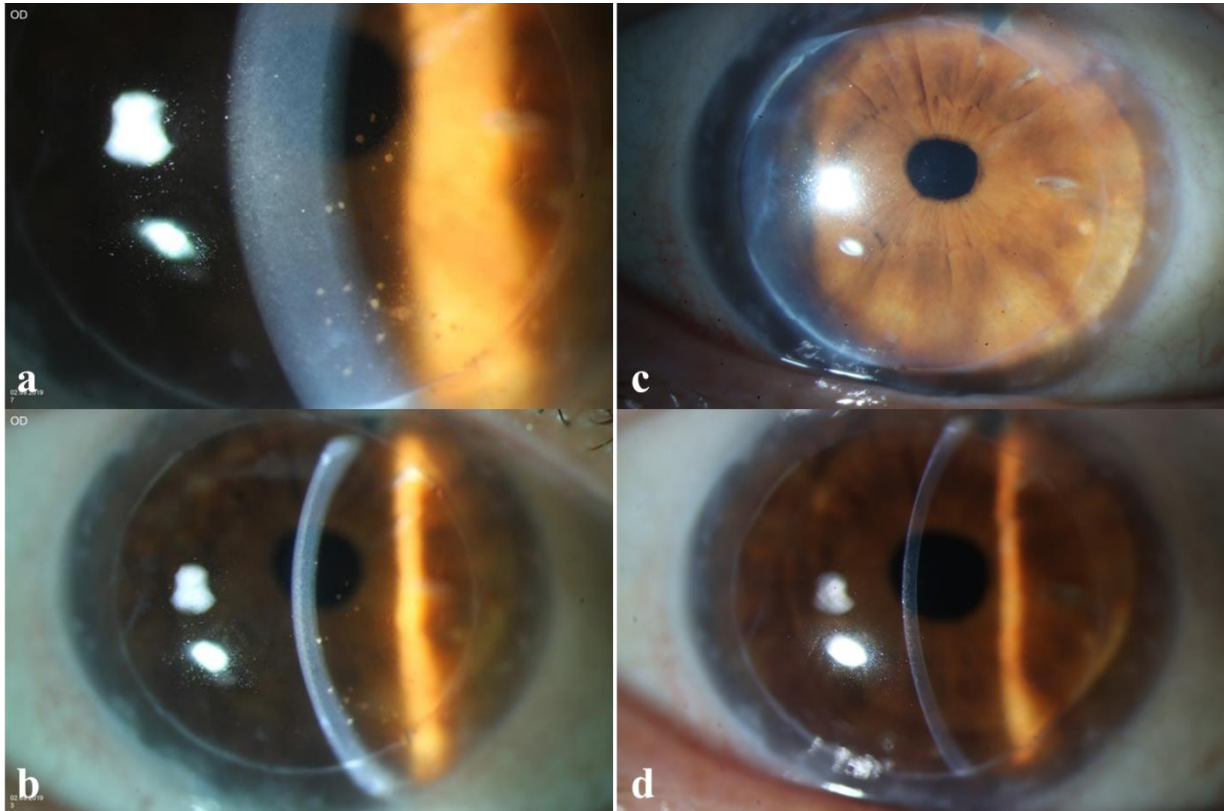
Die Werte für SIA und TIA im Gesamtkollektiv (intrakapsulär und Add-On) sind in der folgenden Grafik zusammengefasst (Abb. 21).



**Abbildung 21:** Höhe des mittleren Zielastigmatismus (TIA) und des mittleren chirurgisch induzierten Astigmatismus (SIA) einen Tag, 6 Wochen und 10 Monate nach Implantation einer torischen IOL zur Behandlung eines hohen Astigmatismus nach perforierender oder tiefer anterior lamellierender Keratoplastik. Die Werte sind absolut sowie im C0- bzw. C45-Meridian aufgetragen. Ausreißer sind als rotes + markiert. In dieser Grafik ist das Gesamtkollektiv (intrakapsuläre und Add-On-IOL) betrachtet. Der mittlere SIA lag zu allen 3 postoperativen Zeitpunkten nah am TIA, was auf eine präzise präoperative Kalkulation hinweist.

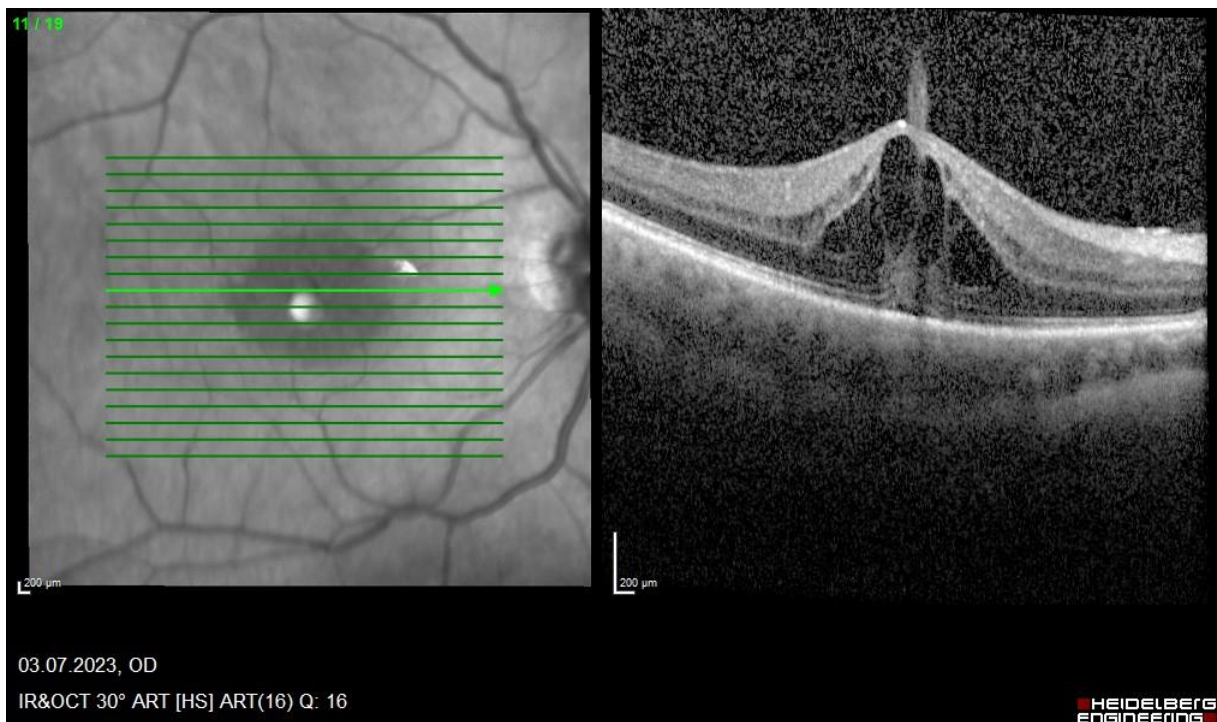
## 5.7 Komplikationen

Ein Auge (0,07%) entwickelte eine akute endotheliale Transplantatabstoßung mit Herabsetzung der BCVA (Snellen dezimal) von 1,0 auf 0,3 66 Tage nach Implantation der torischen IOL (Abb. 22). Die Abstoßungsreaktion wurde mit einer intensivierten systemischen und lokalen Kortikosteroidtherapie sowie einer intrakameralen Dexamethason-Eingabe behandelt. Daraufhin kam es zu einer restitutio ad integrum mit erneutem Visusanstieg auf 1,0.



**Abbildung 22:** Breite (a) und dünne (b) Spaltlampenfotografie des rechten Auges des einen Studienpatienten mit kaudalen retrokornealen Präzipitaten und diffusem Stromaödem im Rahmen einer akuten endothelialen Abstoßungsreaktion 2 Monate nach Implantation der torischen IOL. Übersicht (c) und dünner Spalt (d) desselben Auges 4 Wochen nach intrakameraler Dexamethason-Eingabe und intensivierter systemischer und lokaler Kortikosteroidtherapie mit völlig klarem Transplantat und normaler Hornhautdicke.

Sechs Augen (4,5%) entwickelten ein postoperatives zystoides Makulaödem (ZMÖ) im Mittel  $43 \pm 27$  Tage nach der tIOL-Implantation (Abb. 23). Sämtliche Fälle von ZMÖ traten in G1 auf. In allen Fällen von ZMÖ kam es nach Applikation von nicht-steroidalen Antiphlogistika-Augentropfen (Nepafenac AT 3 mg/ml 1x/täglich für 4 Wochen) zu einer vollständigen Resorption.



**Abbildung 23:** Die optische Kohärenztomographie der Makula zeigt exemplarisch ein postoperatives zystoides Makulaödem im Sinne eines Hruby-Irvine-Gass-Syndroms am rechten Auge eines Studienpatienten 29 Tage nach Implantation der torischen IOL.

Weder ein primäres noch ein sekundäres Transplantatversagen wurde bei den 134 Augen im Nachbeobachtungszeitraum der Studie festgestellt. Eine postoperative Rotation der tIOL, die eine sekundäre chirurgische Nachrotation erfordert hätte, trat im untersuchten Nachbeobachtungszeitraum bei keinem Auge auf.

## 6 Diskussion

Diese retrospektive, monozentrische Studie untersuchte und verglich die Effektivität von torischen intrakapsulären und sulkus-fixierten Add-on-IOL in 134 Augen zur Behandlung eines hohen, größtenteils regelmäßigen Astigmatismus nach vorangehender PKP oder DALK. Eine Vielzahl an prä- und postoperativen Parametern inkl. Keratometrie, Aberrometrie, Visus, Refraktion, Endothelzelldichte, vektorieller Astigmatismusänderung und Komplikationen wurde erhoben und analysiert.

### 6.1 Visus

Die Visusergebnisse nach intrakapsulärer tIOL-Implantation in dieser Studie sind vergleichbar mit aktuell in der Literatur publizierten Daten. In unserer Studie lag die mittlere CDVA in G1 10 Monate nach der Operation bei 0,22 logMAR. Moreno-Martinez et al. berichteten bei 75 Augen nach PKP oder DALK über eine CDVA von  $0,2 \pm 0,3$  logMAR 12 Monate nach intrakapsulärer tIOL-Implantation (MORENO-MARTINEZ et al., 2024). Interessanterweise fiel die mittlere CDVA (logMAR) in der genannten Studie nach 5 Jahren auf  $0,3 \pm 0,32$  bei IOL-Zylinderstärke von  $\leq 6$  D und auf  $0,48 \pm 0,49$  bei IOL-Zylinderstärke von  $\geq 6$  D ab. Ob eine derartige Entwicklung in unserem Patientenkollektiv ebenfalls zu beobachten wäre, ist aufgrund des limitierten Follow-Up-Zeitraums nicht zu validieren. Pellegrini et al. berichteten über noch bessere Ergebnisse bei einer mittleren CDVA von  $0,11 \pm 0,12$  logMAR 6 Monate nach PKP oder DALK (PELLEGRINI et al., 2022). In einer kleineren Kohorte berichteten Wade et al. über eine sehr gute mittlere CDVA von  $0,08 \pm 0,13$  logMAR bis zu 3 Jahre nach der tIOL-Implantation (WADE et al., 2014). In einer neuseeländischen Studie konnten Lockington et al. bei 26 Augen eine mittlere CDVA von  $0,15 \pm 0,16$  logMAR 14 Monate nach der tIOL-Implantation nachweisen (LOCKINGTON et al., 2014). 92% der Augen in der genannten Studie erreichten zum letzten postoperativen Follow-Up eine CDVA von 20/40 nach Snellen oder besser (LOCKINGTON et al., 2014). Mit den von uns gefundenen 94 von 103 Augen (91%) mit  $CDVA \geq 20/40$  nach Snellen ist dieses Ergebnis sehr gut vereinbar. Die Verbesserung der mittleren UDVA nach intrakapsulärer tIOL-Implantation bei vorangehender Keratoplastik scheint international ähnlich. Die berichteten Ergebnisse schwanken in mehreren aktuellen Studien stets um etwa 0,5 logMAR (LOCKINGTON et al., 2014; MORENO-MARTINEZ et al., 2024; PELLEGRINI et al., 2022). Ob lediglich die Vorderfläche bzw. die

Rückfläche der IOL ein torisches Design aufweist, oder ob eine bi-torische Oberfläche vorliegt, scheint keinen Einfluss auf die postoperative Entwicklung der Sehschärfe zu haben (MOON et al., 2020).

In einer neuseeländischen Studie zu torischen Add-On-IOL nach vorangehender PKP oder DALK berichteten Meyer et al. bei 10 Augen über eine mittlere CDVA (logMAR) von 0,1 zehn Monate nach der tIOL-Implantation, ausgehend von 0,2 präoperativ (MEYER, MCGHEE, 2015). Srinivasan et al. berichteten über eine Verbesserung der mittleren UDVA (logMAR) von 1,13 auf 0,48 und der mittleren CDVA von 0,31 auf 0,26 17 Monate nach Implantation einer torischen Add-on-IOL bei 9 Augen nach PKP (SRINIVASAN et al., 2013). In unserer Studie lag die letzte mittlere CDVA bei 0,3, ausgehend von 0,49 präoperativ. Die durchschnittliche Verbesserung der mittleren CDVA um 1-2 logMAR-Stufen durch Implantation der torischen Add-On-IOL in unserer Studie scheint somit international vergleichbar.

## 6.2 Sphärisches Äquivalent

Die refraktiven Ergebnisse dieser Studie sind international vergleichbar (LOCKINGTON et al., 2014; PELLEGRINI et al., 2022). 86 % der intrakapsulären tIOL und 77 % der Add-on-tIOL lagen 10 Monate postoperativ innerhalb von  $\pm 1,0$  D des präoperativ vorhergesagten SÄ. Die postoperative Verringerung des mittleren SÄ durch die intrakapsuläre tIOL-Implantation war in unserer Studie signifikant. In der Add-On-Gruppe erreichte die Veränderung des mittleren SÄ keine statistische Signifikanz. Dies ist zum einen der geringeren Fallzahl ( $n = 19$ ) und zum anderen der bereits vorliegenden Pseudophakie zuzuschreiben, da in diesen Augen zumeist keine sphärische, sondern nur eine zylindrische Korrektur mit der Add-On-Linse angestrebt wird.

Die Vorhersagbarkeit des refraktiven Ergebnisses nach Implantation einer tIOL in Augen mit vorangehender Keratoplastik ist jedoch geringer als bei nicht voroperierten Augen (ABULAFIA et al., 2015). Eine volle präoperative Übereinstimmung des topographisch und manifest refraktiv gemessenen Astigmatismus bei Augen mit vorangehender PKP oder DALK ist unwahrscheinlich. Auch wenn es keinen festgelegten Grenzwert gibt, um die Wirksamkeit einer tIOL-Implantation unter diesen Umständen vorherzusagen, sollten erhebliche präoperative Diskrepanzen zwischen TCRA und MRA oder deren Achsen mit Vorsicht behandelt werden. Chirurgen müssen dabei berücksichtigen, dass der Grad des irregulären Astigmatismus bei Augen mit vorangehender PKP/DALK in der Regel höher ist. Ob der hohe

Anteil an Re-Keratoplastiken in dieser Studie (24,6 %) in diesem Zusammenhang einen zusätzlichen Einfluss auf die Vorhersagbarkeit bzw. die Streuung der MRA nach tIOL-Implantation hat, ist nicht bekannt.

WFA HORMS kann bei nicht voroperierten Hornhäuten als effektiver präoperativer Surrogatmarker dienen, um zwischen regulärem und irregulärem Astigmatismus zu unterscheiden. In dieser Studie wurde jedoch selbst bei Augen mit mäßigem bis hohem präoperativem WFA HORMS eine signifikante Verringerung der MRA mit nur geringfügiger Abweichung vom Ziel-SÄ erreicht. Weitere Studien sind erforderlich, um festzustellen, ob in diesem Szenario ein Schwellenwert für die präoperative Übereinstimmung zwischen TCRA und MRA, Achse sowie WFA HORMS festgelegt werden sollte.

Da tIOL-Modelle mit höherer Zylinderstärke erst während der Studie auf den Markt kamen, war eine vollständige Astigmatismuskorrektur bei Augen mit sehr hohem präoperativem Astigmatismus nicht immer möglich, insbesondere in früheren Jahren. Das refraktive Ziel bei diesen Augen bestand darin, eine signifikante Reduktion des Gesamtastigmatismus zu erreichen und eine Aniseikonie zu kompensieren, um anschließend eine ausreichende sphärozyklindrische Korrektur zu erleichtern bzw. zu ermöglichen.

### 6.3 Endothelzellzahl

Ein gewisser Grad an Endothelzellverlust nach gewöhnlicher Phakoemulsifikation und Hinterkammerlinsenimplantation zur Behandlung einer senilen Katarakt ist allgemein bekannt. Der durchschnittliche Verlust an EZD nach drei Monaten liegt dabei bei etwa 11% (BAMDAD et al., 2018). Eine kürzere Achsenlänge, ein Diabetes mellitus sowie eine intraoperative Hinterkapselruptur verstärken den postoperativen Endothelzellverlust (YAMAZOE et al., 2011). Im Vergleich mit Augen, bei denen nur die Kataraktoperation durchgeführt wurde, ist der postoperative Endothelzellverlust bei Augen, die eine tIOL nach PKP erhalten, signifikant erhöht (MOON et al., 2020). In unserer Studie sank die EZD nach intrakapsulärer tIOL-Implantation im untersuchten Follow-Up-Zeitraum signifikant. Die Rate an Endothelzellverlust nach tIOL-Implantation bei Augen mit vorangehender Keratoplastik scheint jedoch im Lauf der ersten fünf postoperativen Jahre kontinuierlich abzusinken (MORENO-MARTINEZ et al., 2024). Nichtsdestotrotz wurde in der vorliegenden Studie kein Fall von endothelialer Transplantatdekompensation beobachtet. Bei Augen mit sehr niedriger EZD nach PKP oder

DALK ( $\leq 500$  Zellen/mm<sup>2</sup>) muss die tIOL-Implantation gegebenenfalls gegen alternative Verfahren abgewogen werden.

#### 6.4 Vektoranalyse

Die Ergebnisse der Vektoranalyse in dieser Studie sind vergleichbar mit bisher publizierten Daten zu tIOL nach Keratoplastik. Lockington et al. zeigten wie in dieser Studie eine milde Überkorrektur des vektoriiellen Astigmatismus mit einem CI von  $1,14 \pm 0,6$  in 26 Augen 14 Monate nach Implantation einer tIOL bei vorangehender Keratoplastik (LOCKINGTON et al., 2014). In 7 Augen nach PKP konnten Muftuoglu et al. ebenfalls eine leichte Überkorrektur der angestrebten zylindrischen Korrektur nachweisen (MUFTUOGLU et al., 2016). Srinivasan et al. konnten in 9 Augen 17 Monate nach tIOL-Implantation zur Behandlung eines Astigmatismus nach Keratoplastik eine deutliche Reduktion des vektoriiellen Astigmatismus in Höhe und Streuung feststellen (SRINIVASAN et al., 2013). Moreno-Martinez et al. hingegen fanden in 75 Augen mit vorangehender PKP oder DALK sechs Monate nach tIOL-Implantation einen astigmatischen CI von  $0,95 \pm 0,10$ , hinweisend auf eine milde Unterkorrektur (MORENO-MARTINEZ et al., 2024). Die Differenzen des erzielten CI in den genannten Studien lassen sich womöglich auf unterschiedliche tIOL-Modelle, präoperativ unterschiedlich stark ausgeprägten Astigmatismus sowie unterschiedliche Art und Weise der tIOL-Implantation (intrakapsulär versus Add-on) zurückführen. Die Art der vorangehenden Keratoplastik spielt diesbezüglich mit hoher Wahrscheinlichkeit ebenfalls eine Rolle. Ob es relevante Unterschiede in der Astigmatismus-Entwicklung nach tIOL-Implantation zwischen Augen mit vorangehender PKP und Augen mit vorangehender DALK gibt, ist bislang noch unklar.

Die Vorhersage der postoperativen astigmatischen Veränderung nach tIOL-Implantation ist in Augen mit vorangehender Keratoplastik komplizierter, was wahrscheinlich auf eine unterschiedliche biomechanische Antwort der Hornhaut auf die Inzisionen zurückzuführen ist (VISSER et al., 2012). Nichtsdestotrotz zeigte die Vektoranalyse nach tIOL-Implantation in beiden Gruppen eine signifikante Reduktion des manifesten refraktiven Astigmatismus zu allen drei postoperativen Zeitpunkten. Die Streuung des refraktiven Astigmatismus in dieser Studie war zehn Monate nach intrakapsulärer tIOL-Implantation niedriger als nach Add-On-tIOL. Dies ist am ehesten auf den hohen präoperativen Astigmatismus und die limitierte torische Korrektur durch die Add-On-IOL zurückzuführen ( $\leq 6,0$  D).

Bei der präoperativen tIOL-Kalkulation muss beachtet werden, dass die keratometrische Brechkraft der Hornhautvorderfläche den durchaus relevanten Astigmatismus der Hornhautrückfläche nicht beachtet. Der Astigmatismus der Hornhautrückfläche wird nur von wenigen modernen IOL-Kalkulationsformeln einberechnet, was postoperativ zu einer Verschiebung in Richtung ATR-Astigmatismus führt (LANGENBUCHER et al., 2023).

## 6.5 Komplikationen

Die akute endotheliale Abstoßungsreaktion nach Linsenimplantation in Augen mit PKP oder DALK stellt eine ernstzunehmende Komplikation dar. Sie kann binnen Stunden eine vehemente Visusminderung, intraokulären Druckanstieg und Schmerzen seitens des Patienten mit sich bringen. Unbehandelt führt eine solche Immunreaktion in der Regel zur globalen, irreversiblen Dekompensation des Transplantats und damit einhergehend zur Notwendigkeit einer Re-Keratoplastik. In unserer Studie kam es bei einem Auge (0,07%) innerhalb der ersten 10 postoperativen Monate zu einer akuten endothelialen Transplantatabstoßung nach intrakapsulärer tIOL-Implantation. Moreno-Martinez et al. berichteten über eine Abstoßungsrate von 9,3% innerhalb der ersten vier Jahre nach der Operation (MORENO-MARTINEZ et al., 2024). Verglichen mit der berichteten 23%-igen Inzidenz mindestens einer endothelialen Abstoßungsperiode innerhalb von 3 Jahren nach PKP ist dies niedrig (BORDERIE et al., 2011). Veröffentlichte Daten zur langfristigen Inzidenz einer endothelialen Transplantatabstoßung nach Add-on-IOL-Implantation existieren unseres Wissens bisher nicht.

Ein ZMÖ im Sinne eines Hrubby-Irvine-Gass-Syndroms entwickelte sich in unserer Studie bei 4,5% der Augen im Mittel 45 Tage nach tIOL-Implantation. Verglichen mit der durchschnittlichen Inzidenz von 0,8% sechs Wochen nach moderner Kataraktchirurgie ohne vorherige Keratoplastik scheint die Inzidenz in unserer Studie hoch (IFTIKHAR et al., 2023). Nichtsdestotrotz waren in unserer Studie sämtliche Fälle von ZMÖ nach adäquater topischer Therapie vollständig rückläufig ohne negativen mittelfristigen Effekt auf das Ergebnis. Bei Patienten mit Diabetes und solchen mit erhöhtem Risiko eines ZMÖ empfiehlt sich eine perioperative prophylaktische Therapie mit nicht-steroidalen, Antiphlogistika-haltigen Augentropfen (z.B. Nepafenac 1 mg/ml 3x täglich bzw. 3 mg/ml 1x täglich) jeweils für zwei Wochen vor und nach der Operation.

## 6.6 Grauzonen

Nicht jeder Patient mit hohem Astigmatismus nach Keratoplastik ist ein geeigneter Kandidat für eine tIOL-Implantation. Bei irregulärem kornealem Astigmatismus ist der torische Korrektoreffekt durch die IOL limitiert und das Verfahren ist generell nicht empfohlen. Falls präoperativ eine zylindrische Brillenkorrektur vom Patienten nicht gut angenommen wird, sollte die Implantation einer Add-On-tIOL unterbleiben. Manche Autoren postulieren jedoch auch bei stabilem irregulärem Astigmatismus einen positiven Effekt der tIOL-Implantation, wobei wenig Daten für Augen nach Keratoplastik vorliegen. Kwitko et al. konnten beispielsweise bei stabilem irregulärem Astigmatismus variabler Genese eine gute refraktive Vorhersagbarkeit nach tIOL-Implantation zeigen (KWITKO et al., 2020). Die Patienten in der genannten Studie zeigten postoperativ eine signifikante Reduktion des mittleren refraktiven Astigmatismus und eine größere Brillenfreiheit (KWITKO et al., 2020). Unserer Ansicht nach sollte die Implantation einer tIOL bei irregulärem Astigmatismus jedoch stets eine Einzelfallentscheidung bleiben.

Die Verwendung formstabiler, hochgasdurchlässiger KL ist nach tIOL-Implantation nicht indiziert, da die KL den irregulären Astigmatismus der Hornhaut neutralisiert und dadurch ein ungewünschter „Netto-Astigmatismus“ durch die tIOL verbleibt. Bei Patienten nach Keratoplastik, die im Alltag oder im Beruf auf die Verwendung der KL angewiesen sind, sollte die tIOL-Implantation daher eher unterbleiben (AIELLO et al., 2017).

Bei jungen Patienten (< 45 Jahre) ohne Katarakt oder Presbyopie eliminiert ein refraktiver Linsenaustausch die Fähigkeit der Akkommodation. Bei diesen Patienten ist gegebenenfalls ein Hornhaut-basiertes Verfahren (z.B. keratorefraktiver Laser, limbusparallele Keratotomien) zu bevorzugen.

Nach Abstoßungsreaktion oder sekundärem Transplantatversagen kann eine Re-Keratoplastik notwendig sein. Die Re-Keratoplastik bei Augen mit tIOL kompromittiert die refraktive Korrektur der ersten tIOL, die nur auf das erste Transplantat zugeschnitten war. Falls eine DMEK nach endotheliale Transplantatversagen unmöglich ist (SEITZ et al., 2022), ist eine IOL-Explantation oft unumgänglich. Dies sollte insbesondere bei jungen Patienten nach Keratoplastik, die für eine tIOL-Implantation in Frage kommen, berücksichtigt werden. Falls eine nicht-torische IOL bereits in das betroffene Auge implantiert wurde, kann eine sekundäre Add-On-IOL-Implantation zum Erreichen der Zielrefraktion erfolgen. Ein großer Vorteil der Add-On-IOL ist die Reversibilität der Korrektur mit der Möglichkeit, die Linse im Falle einer

instabilen kornealen Refraktion oder während einer Re-Keratoplastik wieder zu entfernen, zu ersetzen oder zu justieren. Chirurgen müssen beachten, dass die Implantation einer Add-on-IOL nicht mit einer Linse aus dem gleichen Material wie die intrakapsuläre IOL durchgeführt werden sollte, da sonst ein Risiko für Trübungen zwischen den Kunstlinsen besteht.

Der erfolgreiche Einsatz einer torischen implantierbaren Kollamerlinse (ICL) nach Keratoplastik bei phakem Auge ist bereits beschrieben worden, allerdings sollten die Ergebnisse in größeren Kohorten validiert werden (AKCAY et al., 2009; ALFONSO et al., 2009).

## 6.7 Alternative Therapieoptionen

Die Implantation einer tIOL ist nicht die einzige verfügbare Therapieoption bei hohem Astigmatismus nach Keratoplastik. Zu den konservativen und unkomplizierteren Methoden zählt die Brillen- oder Kontaktlinsenanpassung. Bei den hierbei verwendeten Kontaktlinsen (KL) handelt es sich um formstabile, hochgasdurchlässige Linsen, die topographisch für die veränderte Krümmung der Oberfläche nach Keratoplastik angepasst werden (BEEKHUIS et al., 1991; EGGINK, NUIJTS, 2001). Für Patienten mit Kontaktlinsenintoleranz aufgrund von Fremdkörpergefühl oder Unfähigkeit des Handlings der KL bleibt oft nur eine der vielen chirurgischen Therapieoptionen.

Chirurgisch ist im Falle eines mit Einzelknüpfnähten befestigten Transplantats die gezielte, Keratometrie-gestützte Entfernung einzelner Hornhautfäden eine Option. Diese Methode ist jedoch im klinischen Alltag inzwischen in den Hintergrund gerückt (BINDER, 1985).

Relaxierende Keratotomien mit oder ohne begleitende Kompressionsnähte ermöglichen nach vollständiger Hornhautfadenentfernung eine zylindrische Korrektur von bis zu 5 D (AL SABAANI et al., 2016; HANNA et al., 1993). Relaxierende Keratotomien werden heutzutage in einer Hornhautstromatiefe von 75-90 %, einem Bogenwinkel von 45-90 ° und 1,0 mm innerhalb der Spender-Empfänger-Grenze limbusparallel durchgeführt. Die Inzisionen werden an beiden Seiten des steilsten Meridians innerhalb der zentralen optischen Zone von 7,0 mm vorgenommen.

10-0 Nylon-Kompressionsnähte können zur Überkorrektur des Astigmatismus im gegenüberliegenden Meridian vorgenommen werden. Durch den sogenannten „coupling-effect“ – ein Abflachen des steilen Meridians geht mit einem Ansteilen des flachen Meridians

einher – ändert sich das sphärische Äquivalent kaum (BERGER et al., 2024; SEITZ, NAUMANN, 1993). Nachteile dieses Verfahrens beinhalten eine schlechte Vorhersagbarkeit der effektiven Astigmatismusreduktion, die Gefahr einer Perforation sowie die mögliche Induktion einer immunologischen Abstoßungsreaktion (FEIZI, ZARE, 2011).

Die Implantation intrastromaler kornealer Ringsegmente (ICRS) ist eine weitere Therapieoption des Astigmatismus nach Keratoplastik. Diese PMMA-basierten Ringsegmente werden in circa 80% Stromatiefe in einer optischen Zone von 5,0 mm implantiert (COSCARELLI et al., 2012). Eine Femtosekundenlaser-assistierte Kreation des Tunnels, in dem die Segmente zum Liegen kommen, hat sich bezüglich der Komplikationsrate einer manuellen Tunnelkreation überlegen gezeigt (MONTEIRO et al., 2020; STRUCKMEIER et al., 2022).

Laserbasierte Eingriffe wie die photorefraktive Keratektomie (PRK) oder die Laser-in-situ-Keratomileusis (LASIK) sind ebenfalls zur Korrektur eines Astigmatismus nach Keratoplastik möglich. Die laserbasierten Eingriffe bergen jedoch Risiken wie die Epithelinvasion, korneale Haze-Bildung, verringertes Transplantatüberleben und Abstoßungsreaktion. Insbesondere bei Patienten mit eingeschränkter Endothelfunktion nach Keratoplastik sollten diese Verfahren aufgrund der höheren Komplikationsraten zurückhaltend eingesetzt werden (HARDTEN et al., 2002; KOVOOR et al., 2009; SPADEA et al., 2021). Die LASIK nach Keratoplastik scheint zudem innerhalb der ersten 6 Jahre stärker zur Regression zu neigen als am nicht voroperierten Auge (DONOSO et al., 2015). In Einzelfällen kann nach Keratoplastik der kombinierte Einsatz von photorefraktiven Laserverfahren und ICRS sinnvoll sein (BERTINO et al., 2022). Bei photorefraktiven Verfahren auf dem Transplantat sollte zur Prävention von iatrogenem kornealem Haze immer Mitomycin C appliziert werden (RAJAN et al., 2006; SANTHIAGO et al., 2012).

Die ultima ratio ist die perforierende Re-Keratoplastik. Diese kann die bestkorrigierte Sehschärfe signifikant verbessern. Obwohl der Astigmatismus im Anschluss an die Re-PKP bei liegenden Fäden meist signifikant geringer ist, kommt es nach vollständiger Fadenentfernung häufig zu einer erneuten Zunahme des Astigmatismus (SZENTMARY et al., 2005).

## 6.8 Limitationen

Eine Limitation dieser retrospektiven Studie besteht darin, dass die Achslage der torischen IOL bei den postoperativen Untersuchungen nicht immer dokumentiert wurde. Eine postoperative Rotation der tIOL von mehr als 15° wurde im untersuchten Zeitraum jedoch in keinem Fall (weder intrakapsulär noch Add-on) beobachtet. Eine Nachrotation bzw. Explantation der tIOL aufgrund von Rotationsinstabilität war bei keinem Auge notwendig.

Eine weitere Limitation dieser Studie insbesondere im Hinblick auf langfristige refraktive Veränderungen ist das begrenzte Follow-Up. Korneale Ektasien und der KK im Besonderen scheinen nach einer PKP langfristig für eine refraktive Instabilität zu prädisponieren, insbesondere bei kleinem Transplantatdurchmesser (DE TOLEDO et al., 2003). Ob ein solcher Effekt durch die Implantation einer tIOL nach PKP oder DALK verstärkt wird, ist bisher nicht geklärt. Ein längeres Follow-Up ist notwendig, um späte postoperative Komplikationen wie progressiven Endothelzellverlust sowie die Inzidenz von später Transplantatabstoßung und Überlebensrate bestimmen zu können.

## 6.9 Fazit

Zusammenfassend ist die Implantation einer tIOL unter bestimmten Voraussetzungen eine hervorragende Therapieoption zur Behandlung eines Astigmatismus nach vorangehender PKP oder DALK. Der präoperative korneale Astigmatismus nach vollständiger Hornhautfadenentfernung sollte zumindest in der zentralen 4-mm-Region der Hornhaut regulär ausgeprägt sein, um ein bestmögliches Ergebnis zu gewährleisten. Die Implantation einer tIOL ermöglicht sodann bei gutem Risikoprofil die simultane Korrektur des refraktiven Fehlers und eine Verbesserung der unkorrigierten und korrigierten Sehschärfe. Etwaige postoperative Komplikationen wie die endotheliale Abstoßungsreaktion oder ein ZMÖ sind selten und bei rascher Diagnose effektiv behandelbar.

## 7 Literaturverzeichnis

1. Abulafia A, Barrett GD, Kleinmann G, Ofir S, Levy A, Marcovich AL, Michaeli A, Koch DD, Wang L, Assia EI (2015) Prediction of refractive outcomes with toric intraocular lens implantation. *J Cataract Refract Surg* 41:936-944
2. Aiello F, Nasser QJ, Nucci C, Angunawela RI, Gatzoufas Z, Maurino V (2017) Cataract Surgery in Patients with Keratoconus: Pearls and Pitfalls. *Open Ophthalmol J* 11:194-200
3. Akcay L, Kaplan AT, Kandemir B, Gunaydin NT, Dogan OK (2009) Toric intraocular Collamer lens for high myopic astigmatism after penetrating keratoplasty. *J Cataract Refract Surg* 35:2161-2163
4. Al Sabaani N, Al Malki S, Al Jindan M, Al Assiri A, Al Swailem S (2016) Femtosecond astigmatic keratotomy for postkeratoplasty astigmatism. *Saudi J Ophthalmol* 30:163-168
5. Alfonso JF, Lisa C, Abdelhamid A, Montes-Mico R, Poo-Lopez A, Ferrer-Blasco T (2009) Posterior chamber phakic intraocular lenses after penetrating keratoplasty. *J Cataract Refract Surg* 35:1166-1173
6. Althomali TA (2013) Posterior chamber toric phakic IOL implantation for the management of pediatric anisometropic amblyopia. *J Refract Surg* 29:396-400
7. Anwar M, Teichmann KD (2002) Big-bubble technique to bare Descemet's membrane in anterior lamellar keratoplasty. *J Cataract Refract Surg* 28:398-403
8. Apple DJ, Sims J (1996) Harold Ridley and the invention of the intraocular lens. *Surv Ophthalmol* 40:279-292
9. Arundhati A, Chew MC, Lim L, Mehta JS, Lang SS, Htoon HM, Tan DT (2021) Comparative Study of Long-term Graft Survival Between Penetrating Keratoplasty and Deep Anterior Lamellar Keratoplasty. *Am J Ophthalmol* 224:207-216
10. Atchison DA, Charman WN (2010) Thomas Young's contribution to visual optics: the Bakerian Lecture "on the mechanism of the eye". *J Vis* 10:16
11. Bamdad S, Bolkheir A, Sedaghat MR, Motamed M (2018) Changes in corneal thickness and corneal endothelial cell density after phacoemulsification cataract surgery: a double-blind randomized trial. *Electron Physician* 10:6616-6623
12. Barrett GD (1993) An improved universal theoretical formula for intraocular lens power prediction. *J Cataract Refract Surg* 19:713-720

13. Beekhuis WH, van Rij G, Eggink FA, Vreugdenhil W, Schoevaart CE (1991) Contact lenses following keratoplasty. *CLAO J* 17:27-29
14. Berger T, Abu Dail Y, Seitz B, Khattabi Z, Flockerzi E, Hamon L, Langenbacher A, Daas L (2024) Outcomes of manual arcuate keratotomy with compression sutures for high regular postkeratoplasty astigmatism. *J Cataract Refract Surg* 50:1254-1261
15. Bertino P, Magalhaes RS, de Souza CJ, Jr., Rocha G, Santhiago MR (2022) Intrastromal corneal ring segments followed by PRK for postkeratoplasty high astigmatism: prospective study. *J Cataract Refract Surg* 48:912-923
16. Binder PS (1985) Selective suture removal can reduce postkeratoplasty astigmatism. *Ophthalmology* 92:1412-1416
17. Borderie VM, Guilbert E, Touzeau O, Laroche L (2011) Graft rejection and graft failure after anterior lamellar versus penetrating keratoplasty. *Am J Ophthalmol* 151:1024-1029 e1021
18. Busin M, Monks T, al-Nawaiseh I (1998) Different suturing techniques variously affect the regularity of postkeratoplasty astigmatism. *Ophthalmology* 105:1200-1205
19. Claesson M, Armitage WJ (2009) Ten-year follow-up of graft survival and visual outcome after penetrating keratoplasty in Sweden. *Cornea* 28:1124-1129
20. Coscarelli S, Ferrara G, Alfonso JF, Ferrara P, Merayo-Llodes J, Araujo LP, Machado AP, Lyra JM, Torquetti L (2012) Intrastromal corneal ring segment implantation to correct astigmatism after penetrating keratoplasty. *J Cataract Refract Surg* 38:1006-1013
21. Davis G (2016) The evolution of cataract surgery. *Missouri medicine* 113:58
22. de Toledo JA, de la Paz MF, Barraquer RI, Barraquer J (2003) Long-term progression of astigmatism after penetrating keratoplasty for keratoconus: evidence of late recurrence. *Cornea* 22:317-323
23. Deshmukh R, Nair S, Vaddavalli PK, Agrawal T, Rapuano CJ, Beltz J, Vajpayee RB (2022) Post-penetrating keratoplasty astigmatism. *Surv Ophthalmol* 67:1200-1228
24. Donoso R, Diaz C, Villavicencio P (2015) Long-term results of LASIK refractive error correction after penetrating keratoplasty in patients with keratoconus. *Arch Soc Esp Oftalmol* 90:308-311
25. Draschl P, Hirschall N, Luft N, Schuschitz S, Wiesinger J, Rigal K, Findl O (2017) Rotational stability of 2 intraocular lenses with an identical design and different materials. *J Cataract Refract Surg* 43:234-238

26. Drexler W, Baumgartner A, Findl O, Hitzenberger CK, Sattmann H, Fercher AF (1997) Submicrometer precision biometry of the anterior segment of the human eye. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 38:1304-1313
27. Drexler W, Findl O, Menapace R, Rainer G, Vass C, Hitzenberger CK, Fercher AF (1998) Partial coherence interferometry: a novel approach to biometry in cataract surgery. *Am J Ophthalmol* 126:524-534
28. Duane A (1912) Normal values of the accommodation at all ages. *Journal of the American Medical Association* 59:1010-1013
29. Eggink FA, Nuijts RM (2001) A new technique for rigid gas permeable contact lens fitting following penetrating keratoplasty. *Acta Ophthalmol Scand* 79:245-250
30. Ekong T (1996) *Peripheral ulcerative keratitis*. Boston: Ocular Immunology Service, Massachusetts Eye and Ear Infirmary Immunology Service:1-15
31. Feizi S, Zare M (2011) Current approaches for management of postpenetrating keratoplasty astigmatism. *J Ophthalmol* 2011:708736
32. Flockerzi E, Turner C, Seitz B, Collaborators GSG (2024) Descemet's membrane endothelial keratoplasty is the predominant keratoplasty procedure in Germany since 2016: a report of the DOG-section cornea and its keratoplasty registry. *British Journal of Ophthalmology* 108:646-653
33. Frost NA, Wu J, Lai TF, Coster DJ (2006) A review of randomized controlled trials of penetrating keratoplasty techniques. *Ophthalmology* 113:942-949
34. Fyodorov SN, Kolinko AI, Kolinko AI (1967) A method of calculating the optical power of the intraocular lens. *Vestn Oftalmol* 80:27-31
35. Fyodorov SN, Galin MA, Linksz A (1975) Calculation of the optical power of intraocular lenses. *Invest Ophthalmol* 14:625-628
36. Glasser A, Campbell MC (1998) Presbyopia and the optical changes in the human crystalline lens with age. *Vision Res* 38:209-229
37. Goggin M, Alpins N, Schmid LM (2000) Management of irregular astigmatism. *Curr Opin Ophthalmol* 11:260-266
38. Grosvenor T (1978) Etiology of astigmatism. *Am J Optom Physiol Opt* 55:214-218
39. Haigis W, Lege B, Miller N, Schneider B (2000) Comparison of immersion ultrasound biometry and partial coherence interferometry for intraocular lens calculation according to Haigis. *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol* 238:765-773
40. Hammond CJ, Snieder H, Gilbert CE, Spector TD (2001) Genes and environment in refractive error: the twin eye study. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 42:1232-1236

41. Hanna KD, Hayward JM, Hagen KB, Simon G, Parel JM, Waring GO, 3rd (1993) Keratotomy for astigmatism using an arcuate keratome. *Arch Ophthalmol* 111:998-1004
42. Hara N, Benedikt K, Owaki H (2024). CASIA2: Anterior Segment 3D Swept-Source OCT. In *Intraocular Lens Calculations*, Aramberri J, KJ Hoffer, T Olsen, G Savini, HJ Shammas, eds. (Cham, Springer International Publishing), pp. 417-429.
43. Hardten DR, Chittcharus A, Lindstrom RL (2002) Long-term analysis of LASIK for the correction of refractive errors after penetrating keratoplasty. *Trans Am Ophthalmol Soc* 100:143-150; discussion 150-142
44. Haripriya A, Gk S, Mani I, Chang DF (2021) Comparison of surgical repositioning rates and outcomes for hydrophilic vs hydrophobic single-piece acrylic toric IOLs. *J Cataract Refract Surg* 47:178-183
45. Hashemi H, Fotouhi A, Yekta A, Pakzad R, Ostadimoghaddam H, Khabazkhoob M (2018) Global and regional estimates of prevalence of refractive errors: Systematic review and meta-analysis. *J Curr Ophthalmol* 30:3-22
46. Hassanpour K, R HE, Arabi A, C RF, A ME, T KE, Arami S, A RD, Kheirkhah A (2022) Peripheral Ulcerative Keratitis: A Review. *J Ophthalmic Vis Res* 17:252-275
47. Hayashi K, Hayashi H, Nakao F, Hayashi F (2000) Influence of astigmatism on multifocal and monofocal intraocular lenses. *Am J Ophthalmol* 130:477-482
48. Hill WE, Haehnle J (2024). Hill-RBF: Improving IOL Power Selection by Artificial Intelligence. In *Intraocular Lens Calculations*, Aramberri J, KJ Hoffer, T Olsen, G Savini, HJ Shammas, eds. (Cham, Springer International Publishing), pp. 637-648.
49. Hoffer KJ (1981) Accuracy of ultrasound intraocular lens calculation. *Arch Ophthalmol* 99:1819-1823
50. Hoffmann F (1978) Nahttechnik bei perforierender Keratoplastik. *Klin Monbl Augenheilkd* 173:696-700
51. Holladay JT, Prager TC, Chandler TY, Musgrove KH, Lewis JW, Ruiz RS (1988) A three-part system for refining intraocular lens power calculations. *J Cataract Refract Surg* 14:17-24
52. Hoppenreijns VP, Van Rij G, Beekhuis WH, Rijneveld WJ, Rinkel-van Driel E (1993) Causes of high astigmatism after penetrating keratoplasty. *Doc Ophthalmol* 85:21-34
53. Iftikhar M, Dun C, Schein OD, Lum F, Woreta F (2023) Cystoid Macular Edema after Cataract Surgery in the United States: IRIS(R) Registry (Intelligent Research in Sight) Analysis. *Ophthalmology* 130:1005-1014

54. Jain S, Azar DT, Pineda R (2002) Management of astigmatism after corneal trauma. *Int Ophthalmol Clin* 42:47-55
55. Javadi MA, Naderi M, Zare M, Jenaban A, Rabei HM, Anissian A (2006) Comparison of the effect of three suturing techniques on postkeratoplasty astigmatism in keratoconus. *Cornea* 25:1029-1033
56. Kaufmann C, Krishnan A, Landers J, Esterman A, Thiel MA, Goggin M (2009) Astigmatic neutrality in biaxial microincision cataract surgery. *J Cataract Refract Surg* 35:1555-1562
57. Kaur K, Gurnani B (2025). Lenticonus. In StatPearls (Treasure Island (FL)).
58. Keane M, Coster D, Ziaei M, Williams K (2014) Deep anterior lamellar keratoplasty versus penetrating keratoplasty for treating keratoconus. *Cochrane Database Syst Rev* 2014:CD009700
59. Kelman CD (1967) Phaco-emulsification and aspiration. A new technique of cataract removal. A preliminary report. *Am J Ophthalmol* 64:23-35
60. Kobashi H, Kamiya K, Shimizu K, Kawamorita T, Uozato H (2012) Effect of axis orientation on visual performance in astigmatic eyes. *J Cataract Refract Surg* 38:1352-1359
61. Koor TA, Mohamed E, Cavanagh HD, Bowman RW (2009) Outcomes of LASIK and PRK in previous penetrating corneal transplant recipients. *Eye Contact Lens* 35:242-245
62. Kratz RP, Mazzocco TR, Davidson B, Colvard DM (1981) The Shearing intraocular lens: a report of 1,000 cases. *J Am Intraocul Implant Soc* 7:55-57
63. Krause K (1989) Grundlagen moderner Refraktionsbestimmung. *Klin Monbl Augenheilkd* 194:301-306
64. Kwitko S, Marafon SB, Stolz AP (2020) Toric intraocular lens in asymmetric astigmatism. *Int Ophthalmol* 40:1291-1298
65. Langenbucher A, Seitz B, Kus MM, Naumann GO (1998) Transplantatverkipfung nach perforierender Keratoplastik - Vergleich zwischen nichtmechanischer Trepanation mittels Excimerlaser und Motortrepanation. *Klin Monbl Augenheilkd* 212:129-140
66. Langenbucher A, Viestenz A, Szentmary N, Viestenz A, Eppig T, Seitz B (2010) Correction of corneal astigmatism with toric lenses: Theory and clinical aspects. *Ophthalmologie* 107:189-201

67. Langenbucher A, Szentmary N, Cayless A, Wendelstein J, Hoffmann P (2023) Prediction of corneal power vectors after cataract surgery with toric lens implantation- A vector analysis. *PLoS One* 18:e0288316
68. Leffler CT, Klebanov A, Samara WA, Grzybowski A (2020) The history of cataract surgery: from couching to phacoemulsification. *Annals of Translational Medicine* 8:1551
69. Levene JR (1966) Sir George Biddell Airy, FRS (1801-1892) and the discovery and correction of astigmatism. *Notes and Records of the Royal Society of London* 21:180-199
70. Linnola RJ, Sund M, Ylonen R, Pihlajaniemi T (1999) Adhesion of soluble fibronectin, laminin, and collagen type IV to intraocular lens materials. *J Cataract Refract Surg* 25:1486-1491
71. Lockington D, Wang EF, Patel DV, Moore SP, McGhee CN (2014) Effectiveness of cataract phacoemulsification with toric intraocular lenses in addressing astigmatism after keratoplasty. *J Cataract Refract Surg* 40:2044-2049
72. Luck J (2010) Customized ultra-high-power toric intraocular lens implantation for pellucid marginal degeneration and cataract. *J Cataract Refract Surg* 36:1235-1238
73. Marcon AS, Cohen EJ, Rapuano CJ, Laibson PR (2003) Recurrence of corneal stromal dystrophies after penetrating keratoplasty. *Cornea* 22:19-21
74. Matalia H, Nandini C, Matalia J (2020) Long-term outcome of custom toric intraocular lens for treating high astigmatism in case of cataract associated with pellucid marginal corneal degeneration. *Indian J Ophthalmol* 68:3082-3084
75. Meyer JJ, McGhee CN (2015) Supplementary, Sulcus-Fixated Intraocular Lens in the Treatment of Spherical and Astigmatic Refractive Errors in Pseudophakic Eyes After Keratoplasty. *Cornea* 34:1052-1056
76. Mihaltz K, Lasta M, Burgmuller M, Vecsei-Marlovits PV, Weingessel B (2018) Comparison of Two Toric IOLs with Different Haptic Design: Optical Quality after 1 Year. *J Ophthalmol* 2018:4064369
77. Miyake T, Kamiya K, Amano R, Iida Y, Tsunehiro S, Shimizu K (2014) Long-term clinical outcomes of toric intraocular lens implantation in cataract cases with preexisting astigmatism. *J Cataract Refract Surg* 40:1654-1660
78. Mohankumar A, Mohan S (2025). Toric Intraocular Lenses. In *StatPearls (Treasure Island (FL))*.

79. Monteiro T, Alfonso JF, Franqueira N, Faria-Correira F, Ambrosio R, Jr., Madrid-Costa D (2020) Comparison of clinical outcomes between manual and femtosecond laser techniques for intrastromal corneal ring segment implantation. *Eur J Ophthalmol* 30:1246-1255
80. Moon J, Yoon CH, Kim MK (2020) Comparative effects of various types of toric intraocular lenses on astigmatism correction. *BMC Ophthalmol* 20:169
81. Moreno-Martinez A, Martin-Melero O, Andres-Pretel F, Gomez-Cortes A, Granados-Centeno JM (2024) Outcomes of Phacoemulsification With Toric Intraocular Lenses in Addressing Postkeratoplasty Astigmatism. *Cornea* 43:76-82
82. Motlagh MN, Moshirfar M, Murri MS, Skanchy DF, Momeni-Moghaddam H, Ronquillo YC, Hoopes PC (2019) Pentacam(R) Corneal Tomography for Screening of Refractive Surgery Candidates: A Review of the Literature, Part I. *Med Hypothesis Discov Innov Ophthalmol* 8:177-203
83. Muftuoglu IK, Akova YA, Egrilmez S, Yilmaz SG (2016) The Results of Toric Intraocular Lens Implantation in Patients With Cataract and High Astigmatism After Penetrating Keratoplasty. *Eye Contact Lens* 42:e8-e11
84. Nanavaty MA, Lake DB, Daya SM (2012) Outcomes of pseudophakic toric intraocular lens implantation in keratoconic eyes with cataract. *J Refract Surg* 28:884-889
85. Naumann GO (1995) The Bowman Lecture. *Eye (Lond)* 9 (Pt 4):395-421
86. Oie Y, Yasukura Y, Nishida N, Koh S, Kawasaki R, Maeda N, Jhanji V, Nishida K (2021) Fourier Analysis on Regular and Irregular Astigmatism of Anterior and Posterior Corneal Surfaces in Fuchs Endothelial Corneal Dystrophy. *Am J Ophthalmol* 223:33-41
87. Olsen T (2007) Calculation of intraocular lens power: a review. *Acta Ophthalmol Scand* 85:472-485
88. Palay DA, Kangas TA, Stulting RD, Winchester K, Litoff D, Krachmer JH (1997) The effects of donor age on the outcome of penetrating keratoplasty in adults. *Ophthalmology* 104:1576-1579
89. Patel CK, Ormonde S, Rosen PH, Bron AJ (1999) Postoperative intraocular lens rotation: a randomized comparison of plate and loop haptic implants. *Ophthalmology* 106:2190-2195; discussion 2196

90. Pellegrini M, Furioli L, Yu AC, Giannaccare G, Scuteri G, Gardeli I, Busin M, Bovone C, Spena R (2022) Outcomes of cataract surgery with toric intraocular lens implantation after keratoplasty. *J Cataract Refract Surg* 48:157-161
91. Pflieger T, Skorpik C, Menapace R, Scholz U, Weghaupt H, Zehetmayer M (1996) Long-term course of induced astigmatism after clear corneal incision cataract surgery. *J Cataract Refract Surg* 22:72-77
92. Ra H, Hwang HS, Kim HS, Kim MS, Kim EC (2020) Toric intraocular lens implantation in cataract patients with corneal opacity. *BMC Ophthalmol* 20:98
93. Rajan MS, O'Brart DP, Patel P, Falcon MG, Marshall J (2006) Topography-guided customized laser-assisted subepithelial keratectomy for the treatment of postkeratoplasty astigmatism. *J Cataract Refract Surg* 32:949-957
94. Ram J, Singh R, Gupta R, Bhutani G, Gupta PC, Sukhija J (2017) Toric intraocular lens implantation in children with developmental cataract and preexisting corneal astigmatism. *Acta Ophthalmol* 95:e95-e100
95. Read SA, Collins MJ, Carney LG (2007) A review of astigmatism and its possible genesis. *Clin Exp Optom* 90:5-19
96. Reinhart WJ, Musch DC, Jacobs DS, Lee WB, Kaufman SC, Shtein RM (2011) Deep anterior lamellar keratoplasty as an alternative to penetrating keratoplasty a report by the American Academy of Ophthalmology. *Ophthalmology* 118:209-218
97. Retzlaff JA, Sanders DR, Kraff MC (1990) Development of the SRK/T intraocular lens implant power calculation formula. *J Cataract Refract Surg* 16:333-340
98. Romano V, Iovieno A, Parente G, Soldani AM, Fontana L (2015) Long-term clinical outcomes of deep anterior lamellar keratoplasty in patients with keratoconus. *Am J Ophthalmol* 159:505-511
99. Ruhswurm I, Scholz U, Zehetmayer M, Hanselmayer G, Vass C, Skorpik C (2000) Astigmatism correction with a foldable toric intraocular lens in cataract patients. *J Cataract Refract Surg* 26:1022-1027
100. Sampath V, Bedell HE (2002) Distribution of refractive errors in albinos and persons with idiopathic congenital nystagmus. *Optom Vis Sci* 79:292-299
101. Santhiago MR, Netto MV, Wilson SE (2012) Mitomycin C: biological effects and use in refractive surgery. *Cornea* 31:311-321
102. Scialdone A, De Gaetano F, Monaco G (2013) Visual performance of 2 aspheric toric intraocular lenses: comparative study. *J Cataract Refract Surg* 39:906-914

103. Seiler T, Koufala K, Richter G (1998) Iatrogenic keratectasia after laser in situ keratomileusis. *J Refract Surg* 14:312-317
104. Seitz B, Naumann GO (1993) Limbus-parallel keratotomies and compression sutures in excessive astigmatism after penetrating keratoplasty. *Ger J Ophthalmol* 2:42-50
105. Seitz B, Langenbucher A, Kuchle M, Naumann GO (2003) Impact of graft diameter on corneal power and the regularity of postkeratoplasty astigmatism before and after suture removal. *Ophthalmology* 110:2162-2167
106. Seitz B, Langenbucher A, Naumann GO (2005) Die perforierende Keratoplastik. Eine 100-jährige Erfolgsgeschichte. *Ophthalmologe* 102:1128-1136, 1138-1129
107. Seitz B, Daas L, Wykrota AA, Flockerzi E, Suffo S (2022) Graft Failure after PKP and DMEK: What is the Best Option? *Klin Monbl Augenheilkd* 239:775-785
108. Shimizu K, Misawa A, Suzuki Y (1994) Toric intraocular lenses: correcting astigmatism while controlling axis shift. *J Cataract Refract Surg* 20:523-526
109. Shoji T, Kato N, Ishikawa S, Ibuki H, Yamada N, Kimura I, Shinoda K (2017) In vivo crystalline lens measurements with novel swept-source optical coherent tomography: an investigation on variability of measurement. *BMJ Open Ophthalmol* 1:e000058
110. Silas MR, Hilkert SM, Reidy JJ, Farooq AV (2018) Posterior keratoconus. *Br J Ophthalmol* 102:863-867
111. Spadea L, Visioli G, Mastromarino D, Alexander S, Pistella S (2021) Topography-Guided Trans-Epithelial No-Touch Photorefractive Keratectomy for High Irregular Astigmatism After Penetrating Keratoplasty: A Prospective 12-Months Follow-Up. *Ther Clin Risk Manag* 17:1027-1035
112. Srinivasan S, Ting DS, Lyall DA (2013) Implantation of a customized toric intraocular lens for correction of post-keratoplasty astigmatism. *Eye (Lond)* 27:531-537
113. Srivannaboon S, Chirapapaisan C, Chonpimai P, Locket S (2015) Clinical comparison of a new swept-source optical coherence tomography-based optical biometer and a time-domain optical coherence tomography-based optical biometer. *J Cataract Refract Surg* 41:2224-2232
114. Struckmeier A-K, Hamon L, Flockerzi E, Munteanu C, Seitz B, Daas L (2022) Femtosecond laser and mechanical dissection for ICRS and MyoRing implantation: a meta-analysis. *Cornea* 41:518-537
115. Sugita J, Kondo J (1997) Deep lamellar keratoplasty with complete removal of pathological stroma for vision improvement. *British Journal of Ophthalmology* 81:184-188

116. Sun XY, Vicary D, Montgomery P, Griffiths M (2000) Toric intraocular lenses for correcting astigmatism in 130 eyes. *Ophthalmology* 107:1776-1781; discussion 1781-1772
117. Suzuki M, Amano S, Honda N, Usui T, Yamagami S, Oshika T (2007) Longitudinal changes in corneal irregular astigmatism and visual acuity in eyes with keratoconus. *Jpn J Ophthalmol* 51:265-269
118. Swinger CA (1987) Postoperative astigmatism. *Surv Ophthalmol* 31:219-248
119. Szentmary N, Seitz B, Langenbucher A, Naumann GO (2005) Repeat keratoplasty for correction of high or irregular postkeratoplasty astigmatism in clear corneal grafts. *Am J Ophthalmol* 139:826-830
120. Tanabe T, Tomidokoro A, Samejima T, Miyata K, Sato M, Kaji Y, Oshika T (2004) Corneal regular and irregular astigmatism assessed by Fourier analysis of videokeratography data in normal and pathologic eyes. *Ophthalmology* 111:752-757
121. Teping P, Hamon L, Langenbucher A, Seitz B, Daas L (2026) Visual and refractive outcomes of intracapsular and add-on toric intraocular lenses in postkeratoplasty astigmatism: a retrospective study. *J Cataract Refract Surg In Druck*
122. Thulasidas M, Kadam A (2024) Toric intraocular lens: A literature review. *Taiwan J Ophthalmol* 14:197-208
123. Ueno Y, Nomura R, Hiraoka T, Kinoshita K, Ohara M, Oshika T (2021) Comparison of corneal irregular astigmatism by the type of corneal regular astigmatism. *Sci Rep* 11:15769
124. Ugurbas SH, Zilelioglu G (1999) Corneal topography in patients with congenital ptosis. *Eye (Lond)* 13 (Pt 4):550-554
125. van Rij G, Waring GO, 3rd (1988) Configuration of corneal trephine opening using five different trephines in human donor eyes. *Arch Ophthalmol* 106:1228-1233
126. Viestenz A, Walter S, Viestenz A, Behrens-Baumann W, Langenbucher A (2007) Torische Intraokularlinsen und Astigmatismuskorrektur. *Ophthalmologe* 104:620-627
127. Visser N, Berendschot TT, Bauer NJ, Nuijts RM (2012) Vector analysis of corneal and refractive astigmatism changes following toric pseudophakic and toric phakic IOL implantation. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 53:1865-1873
128. Visser N, Bauer NJ, Nuijts RM (2013) Toric intraocular lenses: historical overview, patient selection, IOL calculation, surgical techniques, clinical outcomes, and complications. *J Cataract Refract Surg* 39:624-637

129. Wade M, Steinert RF, Garg S, Farid M, Gaster R (2014) Results of toric intraocular lenses for post-penetrating keratoplasty astigmatism. *Ophthalmology* 121:771-777
130. Walsh G, Charman WN (1988) The effect of pupil centration and diameter on ocular performance. *Vision Res* 28:659-665
131. Williams HP (2001) Sir Harold Ridley's vision. *Br J Ophthalmol* 85:1022-1023
132. Yamazoe K, Yamaguchi T, Hotta K, Satake Y, Konomi K, Den S, Shimazaki J (2011) Outcomes of cataract surgery in eyes with a low corneal endothelial cell density. *J Cataract Refract Surg* 37:2130-2136
133. Zirm E (1906) Eine erfolgreiche totale Keratoplastik. *Graefes Arch Ophthalmol* 64:580-593

## 8 Danksagung

An erster Stelle möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr. med. Berthold Seitz, Direktor der Klinik für Augenheilkunde des UKS Homburg/Saar, für die Möglichkeit bedanken, unter seiner Leitung promovieren zu dürfen.

Ein besonderer Dank gilt Herrn Dr. med. Loay Daas, meinem Betreuer bei der Erstellung dieser Arbeit. Seine Expertise, Hilfsbereitschaft, und permanente Verfügbarkeit waren für mich von unschätzbarem Wert. Auch meinem zweiten Betreuer Herrn Loïc Hamon möchte ich an dieser Stelle herzlich danken.

Für die wertvolle Unterstützung bei der Vektoranalyse möchte Ich mich herzlich bei Herrn Prof. Dr. Achim Langenbacher, Institutsleiter der Experimentellen Ophthalmologie, Universität des Saarlandes, bedanken.

Für die effiziente Hilfe bei der statistischen Auswertung möchte ich mich besonders bei Herrn Cristian Munteanu bedanken.

Der größte Dank für die fortwährende Unterstützung in meinem professionellem wie privatem Leben gilt meiner Familie. Mama, Papa, Fritz, Almud, ohne Euren Rückhalt wäre mir die Erstellung dieser Arbeit nicht möglich gewesen.

## 9 Publikationen

2025:

Teping P, Hamon L, Seitz B, Daas L (2025) Die Excimerlaser-assistierte Keratoplastik ist erfolgreich im Management komplizierter Fälle von intrakornealen Ringsegmenten beim Keratokonus. *Ophthalmologie* 122:819-825

Federspiel JM, Reil JC, Schmidt PH, Teping P, Ramsthaler F, Schwab T, Schäfers HJ (2025) Aortic valve morphology rather than aortic valve function, aortic dilatation, and age interferes with ascending aortic structural and biomechanical properties. *Cardiovasc Pathol.* 80:107782

2022:

Balint B, Federspiel J, Kollmann C, Teping P, Schwab T, Schäfers HJ. SMAD3 contributes to ascending aortic dilatation independent of transforming growth factor-beta in bicuspid and unicuspid aortic valve disease. *Sci Rep.* 12:15476