

**Aus der Augenklinik und Poliklinik  
der Universität Würzburg  
Direktor: Professor Dr. med. Jost Hillenkamp**

**Astigmatismuskorrektur  
im Rahmen moderner,  
minimalinvasiver Kataraktchirurgie –  
eine retrospektive Analyse**

**Inauguraldissertation  
zur Erlangung der Doktorwürde der  
Medizinischen Fakultät  
der  
Julius-Maximilians-Universität Würzburg**

**vorgelegt von  
Konstantinos Arampatzis  
aus Larissa, Griechenland**

**Würzburg, Oktober 2019**



**Referent:** Professor Dr. med. Jost Hillenkamp

**Korreferent:** Professor Dr. med. Wolfgang Lieb

**Dekan:** Professor Dr. med. Matthias Frosch

**Tag der mündlichen Prüfung:** 26.06.2020

**Der Promovend ist Arzt**

allen Patienten gewidmet



## Abkürzungen

$\Delta l$	Längenänderung
$\mu\text{m}$	Mikrometer
A	Querschnitt
Abb.	Abbildung
AE	Angle of Error ( <i>Winkelfehler</i> )
BCVApre	bestkorrigierte Sehschärfe präoperativ
bzw.	beziehungsweise
CA	Coefficient of Adjustment ( <i>Anpassungskoeffizient</i> )
ca.	circa
CCW	counterclockwise ( <i>gegen den Uhrzeigersinn</i> )
CI	Correction Index ( <i>Korrekturindex</i> )
Cos	Kosinus
CW	clockwise ( <i>im Uhrzeigersinn</i> )
d. h.	das heißt
Dpt	Dioptrien
DV	Difference Vector ( <i>Differenzvektor</i> )
ECM	extrazelluläres Matrix
EDO	Einzeldosisiophthiolen
E-Modul	Elastizitätsmodul
enth.	enthält
F	Kraft
Fa.	Firma
FACS	Fellow of the American College of Surgeons ( <i>Mitglied der US-amerikanischen chirurgischen Fachgesellschaft</i> )
FDA	The United States Food and Drug Administration ( <i>Behörde für Lebens- und Arzneimittel der Vereinigten Staaten</i> )
FE	Flattening Effect ( <i>Abflachungseffekt</i> )
FEM	Finite-Elemente-Methode
FI	Flattening Index ( <i>Abflachungsindex</i> )
FRACO	Fellow of the Royal Australian College of Ophthalmology ( <i>Mitglied der australischen ophthalmologischen Fachgesellschaft</i> )
FRCOphth	Fellow of the Royal College of Ophthalmologists ( <i>Mitglied der englischen ophthalmologischen Fachgesellschaft</i> )
HCL	Chlorwasserstoff
IE	internationale Einheiten
Inc.	Incorporation ( <i>Namenszusatz bei der US-amerikanischen Unternehmensform Corporation</i> )
IOL	Intraokularlinse
IOS	Index of Success ( <i>Erfolgsindex</i> )

Kap	Kapitel
KW-Test	Kruskal-Wallis-Test
$l_0$	Originallänge
LogMAR	Logarithm of the Minimum Angle of Resolution ( <i>Akronym für den Logarithmus des minimalen Auflösungswinkels</i> )
LRI	limbale Relaxationsinzisionen
Ltd.	Limited Company ( <i>Kapitalgesellschaft</i> )
m	Meter
MD	medical doctor ( <i>Dr. med.</i> )
ME	Magnitude of Error ( <i>Größe des Fehlers</i> )
mg	Milligramm
ml	Milliliter
mm	Millimeter
nm	Nanometer
o. g.	oben genannte(r/s)
PCCRI	Periphere Clear-Cornea-Relaxationsinzision
PMMA	Polymethylmethacrylat
REFb	Refraktion auf Brillenebene
REFc	Refraktion auf kornealer Ebene
Pte. Ltd.	Private Limited Company ( <i>Kapitalgesellschaft mit beschränkter Haftung</i> )
s.	siehe
S.	Seite
S.CI	Spherical Correction Index ( <i>Index der sphärischen Korrektur</i> )
S.Diff	Spherical Difference ( <i>sphärische Differenz</i> )
S.IOS	Spherical Index of Success ( <i>sphärischer Erfolgsindex</i> )
SD	Standardabweichung
SE	Sine EDO
SIA	Surgically Induced Astigmatism ( <i>chirurgisch induzierter Astigmatismus</i> )
sog.	sogenannte(r/s)
TIA	Target Induced Astigmatism ( <i>gezielt induzierter Astigmatismus</i> )
TIOL	torische intraokulare Hinterkammerlinse
UCVA <sub>post</sub>	unkorrigierte Sehschärfe postoperativ
USA	United States of America ( <i>Vereinigte Staaten von Amerika</i> )
WHO	World Health Organization ( <i>Weltgesundheitsorganisation</i> )
vgl.	vergleiche
vs.	versus
YAG	Yttrium-Aluminium-Granat
z. B.	zum Beispiel
$\varepsilon$	Dehnung
$\sigma$	Spannung

## Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einleitung</b> .....	1
1.1 Anatomie der Hornhaut.....	3
1.2 Biomechanik der Hornhaut .....	8
1.3 Die korneale Wundheilung nach keratorefraktiven Eingriffen bzw. Verletzungen .....	13
1.4 Astigmatismus-Erzeugung.....	15
1.5 Astigmatismus-Epidemiologie.....	17
1.6 Astigmatismuskorrektur im Rahmen der Kataraktoperation.....	18
1.7 Limbusparallele astigmatismuskorrigierende Hornhautinzisionen .....	21
1.8 Torische intraokulare Linsen - Einleitung.....	31
1.9 Der Effekt des Kataraktzugangs .....	52
<b>2. Material und Methoden</b> .....	54
2.1 Patientengruppen .....	55
2.2 Erfasste Messdaten .....	55
2.3 Perioperative Instrumenten- und Medikamentenanwendung.....	59
2.4 Postoperative Nachbetreuung und medikamentöse Begleittherapie ....	63
2.5 Zielgrößen .....	63
2.6 Statistische Methoden .....	63
2.7 Astigmatismusanalyse .....	64
<b>3. Ergebnisse</b> .....	80
<b>3.1 Das zeitliche Verhalten der PCCRI (Periphere Clear-Cornea         Relaxationsinzisionen)</b> .....	80
3.2 Gruppe I: PCCRI.....	84
3.2.1 Biometrische Auswertung .....	84
3.2.2 Topographische Auswertung .....	89
3.2.3 Refraktive Auswertung.....	102
3.3 Gruppe II: Torische Intraokularlinsen.....	113
3.3.1 Biometrische Auswertung .....	113
3.3.2 Refraktive Auswertung.....	117
<b>4. Diskussion</b> .....	130
4.1 Astigmatismusreduktion im allgemeinen.....	130
4.2 PCCRI .....	133

4.2.1 Zeitliches Verhalten .....	133
4.2.2 Statistisch signifikante Korrelationen .....	134
4.2.3 Fehlkorrektur / Überkorrektur durch PCCRI.....	135
4.2.4 Sicherheit – Effektivität der PCCRI.....	139
4.2.5 Vergleich der refraktiven und topographischen Auswertung.....	140
4.2.6 Der Einfluss der AE ( <i>Angle of Error</i> ).....	140
4.2.7 Komplikationen .....	141
4.2.8 Optimierungsmöglichkeiten .....	142
4.2.9 Aussichten .....	143
4.3 Torische Intraokularlinsen.....	145
4.3.1 Achsenabweichung.....	145
4.3.2 Statistisch signifikante Korrelationen .....	145
4.3.3 Sicherheit – Effektivität der TIOL .....	146
4.3.4 Effekt der Achsenabweichung .....	151
4.3.5 Komplikationen .....	151
4.3.6 Optimierungsmöglichkeiten .....	152
4.3.7 Aussichten .....	152
4.3.8 Sulcusimplantation.....	155
4.4 Vergleich zwischen PCCRI und TIOL.....	155
4.4.1 Alter .....	155
4.4.2 Präoperativ vorhandener Astigmatismus .....	157
4.4.3 Postoperativ vorhandener Astigmatismus .....	158
4.4.4 Erfolg der Operation .....	159
4.4.5 Bewertung der Astigmatismuskorrektur durch TIOL und PCCRI .....	160
4.4.6 Anwendungsbereiche PCCRI, TIOL .....	161
<b>5. Zusammenfassung .....</b>	<b>162</b>
<b>6. Literaturverzeichnis .....</b>	<b>164</b>



## Abbildungsverzeichnis

<b>Abbildung 1:</b> Die Hornhautschichten .....	3
<b>Abbildung 2:</b> Die Korrelation zwischen Keratozytendichte der Hornhaut und Alter .....	5
<b>Abbildung 3:</b> Kollagenlamellen, Hornhautstroma .....	6
<b>Abbildung 4:</b> Spannungs-Dehnungsmodelle .....	9
<b>Abbildung 5:</b> Der Einfluss der Hydratation auf die Spannungsverteilung in der Hornhaut .....	12
<b>Abbildung 6:</b> Der Kreis kleinster Verwirrung .....	16
<b>Abbildung 7:</b> Das Nichamin-Nomogramm für periphere korneale Inzisionen .....	25
<b>Abbildung 8:</b> Die Diskrepanz der Inzisionslänge in mm festgelegt zwischen einer kleinen und einer großen Hornhaut.....	26
<b>Abbildung 9:</b> Das Eye-Tracking-System Verion Digital Marker der Firma Alcon: präoperative Planung und intraoperative Bilder .....	29
<b>Abbildung 10:</b> Die AA4203TF torische IOL der Firma STAAR® .....	31
<b>Abbildung 11:</b> RayOne® asphärische torische IOL der Firma Rayner .....	33
<b>Abbildung 12:</b> Die T-flex® asphärische torische IOL der Firma Rayner .....	33
<b>Abbildung 13:</b> Die TORICA®-aA (MC 6125 T) der Firma Humanoptics .....	34
<b>Abbildung 14:</b> Die ACRYSOF® IQ SN6ATT torische IOL der Firma Alcon ...	35
<b>Abbildung 15:</b> Die AT TORBI® 709M/MP der Firma Zeiss .....	35
<b>Abbildung 16:</b> Die TECNIS® ZCT torische IOL der Firma Abbott.....	36
<b>Abbildung 17:</b> Die enVista™ TORIC der Firma Bausch + Lomb .....	37
<b>Abbildung 18:</b> Die Trulign® Toric der Firma Bausch + Lomb .....	37
<b>Abbildung 19:</b> Die Vivinex™ XY1A bzw. Vivinex™ XY1A iSert® preloaded Toric der Firma Hoya .....	38
<b>Abbildung 20:</b> Die Lentis® Comfort Toric der Firma Oculentis.....	39
<b>Abbildung 21:</b> Die 565 Precizon® Toric der Firma Ophtec .....	39
<b>Abbildung 22:</b> Die DOMICRYL BIFLEX T der Firma Polytech-Domilens .....	40
<b>Abbildung 23:</b> Die Basis Z torisch der Firma 1stQ.....	41
<b>Abbildung 24:</b> Die Basis V torisch der Firma 1stQ .....	41
<b>Abbildung 25:</b> Die ARTIS® T PL der Firma Afidera .....	42
<b>Abbildung 26:</b> Die SAL Toric der Firma Afidera.....	42

<b>Abbildung 27:</b> Die ALSAFIT TORIC VF der Firma Argonoptics.....	43
<b>Abbildung 28:</b> Die Acriva <sup>UD</sup> BB T UDM 611 der Firma Ruck .....	44
<b>Abbildung 29:</b> Die Visiotis toric + der Firma IOL Expert .....	44
<b>Abbildung 30:</b> Die MINI 4 Ready toric der Firma W2O .....	45
<b>Abbildung 31:</b> Schematisches Bild der kapsulären Kompression bei C-Schlaufenhaptiken, die eine Linsenrotation entgegen dem Uhrzeigersinn erzeugen kann .....	48
<b>Abbildung 32:</b> Die prozentuale Auswirkung der Achsenabweichung der TIOL auf die Korrektur des refraktiven Astigmatismus.....	51
<b>Abbildung 33:</b> Die präoperative Markierung der Hornhaut an der Spaltlampe .....	57
<b>Abbildung 34:</b> Nomogramm zur Planung der PCCRI .....	58
<b>Abbildung 35:</b> Online-Rechner der Firma Alcon für die präoperative Berechnung der torischen Intraokularlinse.....	59
<b>Abbildung 36:</b> Messring nach Mendez (G-33760, Geuder).....	61
<b>Abbildung 37:</b> Diamantmesser für Keratotomie Titan/ 1 Schnittkante 45° 0,5 mm (G-19345, Geuder).....	62
<b>Abbildung 38:</b> Hornhautmarkierer 4 Klingen Innendurchmesser/ 3,0 mm/ Außendurchmesser 12 mm (G-33725, Geuder) .....	62
<b>Abbildung 39a, b, c:</b> Astigmatismusanalyse nach <i>Alpins</i> .....	67
<b>Abbildung 40:</b> Der Effekt der Achsenabweichung bei der Astigmatismuskorrektur auf den Abflachungsindex .....	71
<b>Abbildung 41:</b> Der Effekt der Achsenabweichung bei der Astigmatismuskorrektur auf die Größe des Restastigmatismus.....	72
<b>Abbildung 42:</b> Der Effekt der Achsenabweichung bei der Astigmatismuskorrektur auf die Achse des Restastigmatismus .....	72
<b>Abbildung 43:</b> Der Effekt der PCCI im zeitlichen Verlauf.....	82
<b>Abbildung 44:</b> Das zeitliche Verhalten des Effektes der PCCRI.....	82
<b>Abbildung 45:</b> Statistischer Vergleich des Effektes der PCCRI im zeitlichen Verlauf .....	83
<b>Abbildung 46:</b> Die Verteilung des Alters der Patienten am Tag der Operation, Gruppe I.....	84
<b>Abbildung 47:</b> Die Häufigkeit des Alters am Tag der Operation, Gruppe I ...	84
<b>Abbildung 48:</b> Die Verteilung der Achsenlänge, Gruppe I .....	85

<b>Abbildung 49:</b> Die Verteilung der Form des präoperativen topographischen Astigmatismus, Gruppe I.....	85
<b>Abbildung 50:</b> Die Verteilung der geplanten Schnittbreite, Gruppe I .....	86
<b>Abbildung 51:</b> Die Verteilung der geplanten Schnitttiefe, Gruppe I .....	87
<b>Abbildung 52:</b> Die Häufigkeit der geplanten Schnitttiefe, Gruppe I.....	87
<b>Abbildung 53:</b> Der bestkorrigierte präoperative LogMAR Visus (BCVAprä), Gruppe I.....	88
<b>Abbildung 54:</b> Der bestkorrigierte postoperative LogMAR Visus (BCVApost), Gruppe I.....	88
<b>Abbildung 55:</b> Die Vektoren des präoperativen topographischen Astigmatismus, Gruppe I.....	89
<b>Abbildung 56:</b> Die Vektoren des postoperativen topographischen Astigmatismus, Gruppe I.....	90
<b>Abbildung 57:</b> Die Vektorendarstellung der TIA, Gruppe I .....	91
<b>Abbildung 58:</b> Die Vektorendarstellung der SIA, topographisch, Gruppe I...	91
<b>Abbildung 59:</b> Die Vektorendarstellung des DV, topographisch, Gruppe I ...	92
<b>Abbildung 60:</b> Streudiagramm der TIA vs. SIA. Daten der topographischen Auswertung, Gruppe I.....	92
<b>Abbildung 61:</b> Der IOS auf der Achse der geplanten Korrektur, Daten der topographischen Auswertung, Gruppe I.....	93
<b>Abbildung 62:</b> Die Häufigkeit der AE, Daten der topographischen Auswertung, Gruppe I.....	96
<b>Abbildung 63:</b> Die Korrelation zwischen dem Alter der Patienten am Tag der Operation und dem Erfolg der Astigmatismusreduktion, Daten der topographischen Auswertung, Gruppe I.....	97
<b>Abbildung 64:</b> Die Korrelation zwischen der Achsenlänge der operierten Augen und dem Erfolg der Astigmatismusreduktion, Daten der topographischen Auswertung, Gruppe I.....	98
<b>Abbildung 65:</b> Die Korrelation zwischen der geplanten Tiefe der Inzisionen und dem Erfolg der Astigmatismusreduktion, Daten der topographischen Auswertung, Gruppe I.....	99
<b>Abbildung 66:</b> Die Korrelation zwischen der geplanten Breite der Inzisionen und dem Erfolg der Astigmatismusreduktion, Daten der topographischen Auswertung, Gruppe I.....	100

<b>Abbildung 67:</b> Die Korrelation zwischen der Form des präoperativen Astigmatismus und dem Erfolg der Astigmatismusreduktion, Daten der topographischen Auswertung, Gruppe I.....	101
<b>Abbildung 68:</b> Die Vektoren des präoperativen refraktiven Astigmatismus, Gruppe I.....	102
<b>Abbildung 69:</b> Die Vektoren des postoperativen refraktiven Astigmatismus, Gruppe I.....	103
<b>Abbildung 70:</b> Die Vektorendarstellung der SIA, refraktiv, Gruppe I.....	103
<b>Abbildung 71:</b> Die Vektorendarstellung des DV, refraktiv, Gruppe I.....	104
<b>Abbildung 72:</b> Streudiagramm der SIA vs. TIA, Daten der refraktiven Auswertung, Gruppe I.....	104
<b>Abbildung 73:</b> Der IOS auf der Achse der geplanten Korrektur, Daten der refraktiven Auswertung, Gruppe I.....	105
<b>Abbildung 74:</b> Korrelation zwischen dem Alter der Patienten am Tag der Operation und dem Erfolg der Astigmatismusreduktion, Daten der refraktiven Auswertung, Gruppe I.....	106
<b>Abbildung 75:</b> Korrelation zwischen der Achsenlänge der operierten Augen und dem Erfolg der Astigmatismusreduktion, Daten der refraktiven Auswertung, Gruppe I.....	107
<b>Abbildung 76:</b> Korrelation zwischen der geplanten Tiefe der Inzisionen und dem Erfolg der Astigmatismusreduktion, Daten der refraktiven Auswertung, Gruppe I.....	108
<b>Abbildung 77:</b> Korrelation zwischen der geplanten Breite der Inzisionen und dem Erfolg der Astigmatismusreduktion, Daten der refraktiven Auswertung, Gruppe I.....	109
<b>Abbildung 78:</b> Korrelation zwischen der Form des präoperativen Astigmatismus und dem Erfolg der Astigmatismusreduktion, Daten der refraktiven Auswertung, Gruppe I.....	110
<b>Abbildung 79:</b> Die Verteilung des Alters am Tag der Operation, Gruppe II	113
<b>Abbildung 80:</b> Die Häufigkeit des Alters am Tag der Operation, Gruppe II	114
<b>Abbildung 81:</b> Die Verteilung der Achsenlänge, Gruppe II.....	114
<b>Abbildung 82:</b> Die Verteilung der Form des präoperativen topographischen Astigmatismus, Gruppe II.....	115

<b>Abbildung 83:</b> Der bestkorrigierte präoperative LogMAR Visus (BCVAprä), Gruppe II.....	115
<b>Abbildung 84:</b> Der bestkorrigierte postoperative LogMAR Visus (BCVApost), Gruppe II.....	115
<b>Abbildung 85:</b> Statistischer Vergleich zwischen BCVA präoperativ und UCVA postoperativ, Gruppe II .....	116
<b>Abbildung 86:</b> Statistischer Vergleich zwischen BCVA präoperativ und BCVA postoperativ, Gruppe II .....	116
<b>Abbildung 87:</b> Die Vektoren des präoperativen topographischen Astigmatismus, Gruppe II.....	117
<b>Abbildung 88:</b> Die Vektoren des präoperativen refraktiven Astigmatismus, Gruppe II.....	118
<b>Abbildung 89:</b> Die Vektoren des postoperativen refraktiven Astigmatismus, Gruppe II.....	119
<b>Abbildung 90:</b> Die Vektorendarstellung der TIA, refraktiv, Gruppe II.....	119
<b>Abbildung 91:</b> Die Vektorendarstellung der SIA, refraktiv, Gruppe II.....	120
<b>Abbildung 92:</b> Die Vektorendarstellung des DV, refraktiv, Gruppe II.....	120
<b>Abbildung 93:</b> Streudiagramm des SIA vs. TIA. Daten der refraktiven Auswertung, Gruppe II .....	121
<b>Abbildung 94:</b> Der IOS auf der Achse der geplanten Korrektur, Daten der refraktiven Auswertung, Gruppe II .....	122
<b>Abbildung 95:</b> Korrelation zwischen dem Alter der Patienten am Tag der Operation und dem Erfolg der Astigmatismusreduktion, Daten der refraktiven Auswertung, Gruppe II .....	123
<b>Abbildung 96:</b> Korrelation zwischen der Achsenlänge der operierten Augen und dem Erfolg der Astigmatismusreduktion, Daten der refraktiven Auswertung, Gruppe II .....	124
<b>Abbildung 97:</b> Korrelation zwischen der Achsenlänge der operierten Augen und der postoperativen Linsenrotation, Daten der refraktiven Auswertung, Gruppe II.....	125
<b>Abbildung 98:</b> Korrelation zwischen der Form des präoperativen Astigmatismus und dem Erfolg der Astigmatismusreduktion, Daten der refraktiven Auswertung, Gruppe II .....	127

<b>Abbildung 99:</b> Postoperative Achsenabweichung der TIOL von der präoperativ angestrebten Achse (°) .....	128
<b>Abbildung 100:</b> Die präoperative Topographie des Patienten T069.....	148
<b>Abbildung 101:</b> Resultierender Astigmatismus nach TIOL-Implantation ....	151
<b>Abbildung 102:</b> Vergleich der Verteilung der Achsenabweichung der TIOL für die Gruppe II und VERION .....	153
<b>Abbildung 103:</b> Statistischer Vergleich des Alters am Tag der Operation zwischen Gruppe I und II .....	156
<b>Abbildung 104:</b> Der präoperative refraktive Astigmatismus, Gruppe I und Gruppe II.....	157
<b>Abbildung 105:</b> Der postoperative refraktive Astigmatismus, Gruppe I und Gruppe II.....	158
<b>Abbildung 106:</b> Statistischer Vergleich des prozentualen Erfolgs der Astigmatismusreduktion zwischen Gruppe I und II, Daten der refraktiven Auswertung.....	159

## Tabellenverzeichnis

<b>Tabelle 1:</b> Übersicht der gängigen Modelle von torischen Intraokularlinsen..	47
<b>Tabelle 2:</b> Ergebnisse nach Durchführung von PCCRI .....	111
<b>Tabelle 3:</b> Die PCCRI-Ergebnisse der Augenklinik der St. Vincentius Augenklinik der Vincentius-Diakonissen-Kliniken gAG, Karlsruhe .....	112
<b>Tabelle 4:</b> Patienten mit hoher postoperativer Achsenabweichung der implantierten TIOL .....	126
<b>Tabelle 5:</b> Die Effektivität der Astigmatismusreduktion durch Implantation von TIOL.....	129
<b>Tabelle 6:</b> Beispiel einer Fehlkorrektur durch PCCRI .....	136
<b>Tabelle 7:</b> Patienten mit einer Fehlkorrektur (Überkorrektur) des Astigmatismus, Gruppe I.....	137
<b>Tabelle 8:</b> Der Vergleich zwischen dem präoperativen und postoperativen Zylinder, refraktiv und topographisch, Gruppe I .....	138
<b>Tabelle 9:</b> Die Auswertung der Patienten der Gruppe II mit IOS > 1 .....	147
<b>Tabelle 10:</b> Vergleichstabelle der Ergebnisse nach Implantation von TIOL, multizentrisch.....	150
<b>Tabelle 11:</b> Vergleich der Achsenabweichung der TIOL zwischen Gruppe II und Gruppe VERION .....	153





## 1. Einleitung

Die altersbedingte Katarakt ist laut *World Health Organization (WHO)* [1] verantwortlich für 51 % der Blindheitsfälle weltweit. Dies entspricht ca. 20 Millionen Menschen weltweit, die durch eine Katarakt erblinden – Tendenz steigend. Die Kataraktoperation ist darüber hinaus der häufigste operative Eingriff in der Medizin. Laut der *American Society of Cataract and Refractive Surgery* erfolgen ca. drei Millionen Kataraktoperationen pro Jahr in den USA [2][*National Health Statistics Reports*, 2009]. In Deutschland erfolgen etwa 700.000 Eingriffe pro Jahr [3][*Deutsches Ärzteblatt*, 2012].

Auch wenn gegenwärtig in vielen Ländern die technische Unterstützung der Kataraktchirurgie noch mangelhaft ist, zeigt sich in entwickelten Ländern wie Deutschland eine Tendenz von der reinen Linsenentfernung in Richtung optimale optische Rehabilitation durch die Kataraktoperation. Heutzutage steht nicht nur die reine Sehverbesserung durch den Ersatz der trüben natürlichen Linse durch eine klare künstliche Intraokularlinse im Vordergrund, sondern auch die postoperative Sehqualität mit geringstmöglichem postoperativem Refraktionsfehler für Ferne und Nähe.

Im Rahmen dieses Ziels korrigiert die moderne, minimalinvasive Kataraktchirurgie nicht nur den sphärischen Anteil, sondern darüber hinaus auch den zylindrischen Anteil des Brechkraftfehlers des operierten Auges.

Man schätzt, dass bei 15-20 % der Bevölkerung ein Astigmatismus von mehr als 1,5 Dpt [4][*Hoffer*, 1980] und bei einem noch höheren Anteil ein Astigmatismus von weniger als 1,5 Dpt vorliegt. Das bedeutet, dass bei 100.000 bis 130.000 Kataraktoperationen jährlich in Deutschland ein klinisch relevanter Astigmatismus von mehr als 1,5 Dpt mitbehandelt werden könnte.

Die Häufigkeit eines bestehenden Astigmatismus und der Wunsch seiner Korrektur im Rahmen der Kataraktchirurgie sowie die Tendenz dahingehend, die Kataraktoperation in früheren Stadien der Linsentrübung durchzuführen – was insbesondere jüngere Patienten mit höherem postoperativem refraktivem Anspruch betrifft –, gaben die Anregung zur Durchführung dieser Arbeit. In einer Zeit begrenzter finanzieller Ressourcen in der Medizin erschien uns in der St. Vincentius Augenklinik der Vincentius-Diakonissen-

Kliniken gAG, Karlsruhe der Kostenaspekt der intraoperativen Astigmatismuskorrektur mittels eines Vergleichs allgemein gängiger Methoden als ein wichtiger Teilaspekt. Auch technologische Fortschritte tragen zu einer ständigen Optimierung der Ergebnisse der intraoperativen Astigmatismuskorrektur bei und gestalten dieses operative Feld der Augenheilkunde besonders spannend. Dazu zählen die Anwendung des Femtosekundenlasers in der Kataraktchirurgie, die Entwicklung von Eye-Tracking-Systemen, welche eine digitale Markierung der Augenoberfläche und die intraoperative Projektion dieser am Operationsmikroskop ermöglichen, sowie neue Systeme, die eine intraoperative Keratographie anbieten.

Bei dieser Arbeit handelt es sich um eine retrospektive Analyse der Astigmatismuskorrektur im Rahmen der modernen, minimalinvasiven Kataraktchirurgie an unserem Patientenkollektiv. Es sollen die Effektivität und die Indikationsstellung zur Anwendung verschiedener Methoden zur Astigmatismuskorrektur, insbesondere im Hinblick auf Sicherheit und Kosten, untersucht werden. Im Allgemeinen besteht das Ziel dieser Arbeit darin, eine interne Qualitätssicherung der Operationsverfahren in unserer Klinik durchzuführen.

## 1.1 Anatomie der Hornhaut

Die refraktive Chirurgie der Hornhaut ist ein fester Bestandteil der Augenheilkunde. Primäres Ziel refraktiver Eingriffe ist es, die Krümmung der Hornhaut mittels Inzisionen im Stromabereich oder einer Laserablation zu modifizieren und dadurch die Refraktion zu optimieren. Grundsätzlich sind Kenntnisse der Anatomie, Physiologie und Biomechanik sowie die anatomischen und physiologischen Konsequenzen der refraktiven Eingriffe unverzichtbare Grundvoraussetzungen für die Interpretation des Effektes der refraktiven Chirurgie der Hornhaut.

Die Hornhaut zeigt folgende Schichtung von außen nach innen (im folgenden Bild von oben nach unten):

(Abbildung 1)

- Hornhautepithel
- Epitheliale Basalmembran
- Bowman-Schicht
- Stroma
- Dua-Schicht
- Descemet-Membran
- Hornhautendothel



**Abbildung 1:** Die Hornhautschichten  
(*Krachmer et al, Cornea, 2. Aufl.*  
2005, S. 4,  
Urheberrechtlich: Elsevier)

- Hornhautepithel

Das menschliche Hornhautepithel ist ein nichtkeratinisiertes, mehrschichtiges Plattenepithel von ca. 50 µm Dicke und beträgt etwa 10 % der gesamten Hornhautdicke. Es ist hydrophob und weist folgende fünf bis sieben Schichten auf:

zwei bis drei Schichten superfizieller Zellen, darunter zwei bis drei Schichten von „Wing“- Zellen und zuunterst findet sich eine einzelne Schicht von säulenförmigen Zellen. Bei letzteren ging man lange Zeit davon aus, dass es sich um die einzigen proliferationsfähigen Zellen der Hornhaut handelt [5][Pfister, 1973].

Neuere Arbeiten verleihen jedoch auch den Endothelzellen eine gewisse Proliferationsfähigkeit. *Mimura et al* (2013) [6] fassen in einer Rezension mehrerer Publikationen zusammen, dass die Zellen des menschlichen Endotheliums der Hornhaut eine begrenzte Proliferationsfähigkeit aufweisen.

- Epitheliale Basalmembran

Sie besteht aus Kollagen vom Typ IV, Laminin und Fibronectin und hat eine Dicke von etwa 40-60 nm [7][Cornea, 2005].

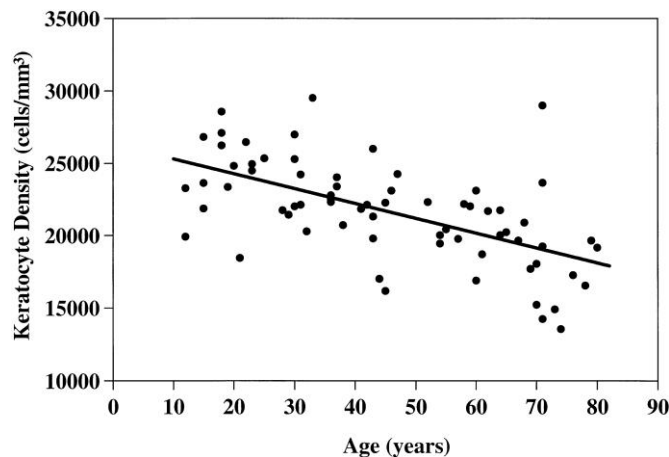
- Bowman-Schicht

Die Bowman-Schicht ist eine azelluläre membranähnliche Kollagenfaserschicht (Typ I). Sie hat eine Dicke von etwa 12 µm und regeneriert sich charakteristischerweise nach einer Verletzung nicht. [7][Cornea, 2005].

- Stroma

Das Stroma macht mehr als 90 % der Hornhautdicke aus. Es ist hydrophil und besteht aus Keratozyten, Kollagenfasern und verschiedenen Glykoproteinen [7] [Cornea, 2005].

Die Keratozyten (korneale Fibroblasten) entsprechen nur 2-3 % des gesamten Stromavolumens [8][Otori, 1967]. Die Zelldichte der Keratozyten wird mithilfe konfokaler Mikroskopie auf  $20.522 \pm 2.981$  Zellen/ mm<sup>3</sup> (Mittelwert  $\pm$  SD) geschätzt. Die Zelldichte ist an den vorderen 10 % des Stromas am höchsten. Die Anzahl der Keratozyten zeigt eine Alterskorrelation, wobei diese um 0,45 % pro Jahr abnimmt [9][Patel et al, 2001].

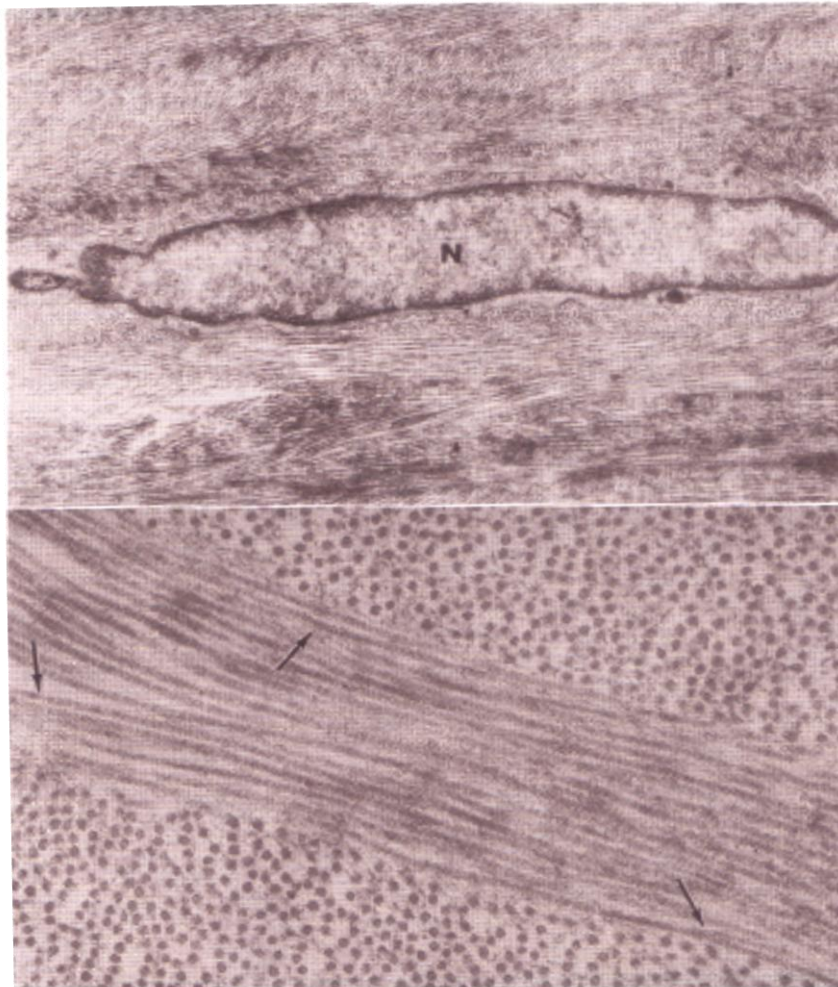


**Abbildung 2:** Die Korrelation zwischen Keratozytendichte der Hornhaut und Alter (Patel et al, *Normal human keratocyte density and corneal thickness measurement by using confocal microscopy in vivo*, IVOS, Febr. 2001, Band 42, Heft 2, S. 333-9, Urheberrechtinhaber: ARVO)

Die Kollagenfasern besetzen den extrazellulären Raum. Etwa 70 % des Trockengewichtes der Kornea besteht aus Kollagen. Hauptkollagentyp ist Typ I; Typen V und VI sind in 10 bzw. 25 % nachweisbar [10][Birk et al, 1986], [11][Yue et al, 1986], [12][Kern et al, 1991]. Die Kollagenfasern des Stromas zeigen sich besonders gleichförmig mit einem Durchmesser von 22,5-35 nm [13][Giraud et al, 1975] und einem stabilen Abstand zwischen den einzelnen Fasern ( $41,4 \pm 0,5$  nm) [14][Hamada et al, 1976]. Die o. g. strikte Gleichförmigkeit der Schichtung der Kollagenfasern ist für die Transparenz der Kornea entscheidend. Wenn Licht in einem Medium auf Unregelmäßigkeiten trifft, so führt dieses zu einer Streuung des Lichts. Im Falle der Hornhaut wird die Lichtstreuung jedoch dadurch vermieden, dass die Kollagenfibrillen mit einem regelmäßigen Abstand zueinander in die Grundsubstanz eingebettet sind und nur einen Durchmesser von 22,5-35 nm haben. Damit beträgt dieser Durchmesser etwa 1/10 der Lichtwellenlänge (380-750 nm), was dazu führt, dass sich das durchtretende Licht nur in Einfallrichtung fortsetzt und mangels Streuzentren nicht gestreut wird. Das Gegenteil geschieht beispielsweise im Falle eines stromalen Ödems oder einer Narbe, die einen Verlust der Hornhauttransparenz bewirken können [15][Seiler, 2000].

Darüber hinaus nehmen die aufeinander geschichteten Kollagenlamellen im Bereich des Limbus und im Zentrum der Hornhaut einen unterschiedlichen Winkel zueinander ein. Der Winkel beträgt im Zentrum  $90^\circ$ ,

in der Peripherie 30° bzw. 120°. Die Anzahl der Lamellen beträgt im Zentrum  $170 \pm 17,6$ , in der Peripherie  $203 \pm 10,3$ . Die mittlere Lamellendicke nimmt von vorne nach hinten im Hornhautzentrum von  $1,1 \mu\text{m}$  auf  $2,7 \mu\text{m}$  zu. Dasselbe gilt annähernd auch für die Hornhautperipherie: Die mittlere Länge der Hornhautlamellen nimmt von der Hornhautmitte zur Peripherie hin ab (von durchschnittlich  $300 \mu\text{m}$  – maximal  $600 \mu\text{m}$  – auf  $100 \mu\text{m}$ ). Demnach ziehen keine Lamellen vom Limbus zum gegenüberliegenden Limbus [15][Seiler, 2000], [16][Komai et al, 1991] (Abbildung 3)



**Abbildung 3:** Kollagenlamellen, Hornhautstroma  
(Hart Jr. *Adler's Physiology of the eye*, 9. Aufl. 1992, S. 38, Urheberrechtsinhaber: Elsevier)

Die menschliche Kornea ist im Zentrum dünner [im Durchschnitt mit dem Dual-Scheimpflug-System (Galilei; Ziemer) gemessen:  $560,57 \pm 29,10 \mu\text{m}$  (Mittelwert  $\pm$  SD), mit der rotierenden Scheimpflugkamera (HR Pentacam; Oculus) gemessen:  $542,31 \pm 30,50 \mu\text{m}$ , mittels Ultraschall-Pachymetrie

(UP-1000; Nidek) gemessen:  $548,61 \pm 29,92 \mu\text{m}$ ] [17][*Jahadi et al*, 2010] und in der Peripherie dicker (etwa  $750 \mu\text{m}$ ) und entspricht somit einer Minuslinse mit einer Brechkraft von 43 Dpt. Dass die Hornhautdicke vom Zentrum zur Peripherie zunimmt, lässt sich allenfalls durch die gleichzeitige Zunahme der Lamellenzahl vom Zentrum in Richtung Peripherie erklären [15][*Seiler*, 2000]. Obwohl zwischen den Messungen mit o. g. Geräten statistisch signifikante Unterschiede bestanden, zeigte sich eine deutliche Korrelation zwischen dem Dual-Scheimpflug-System (Galilei; Ziemer) und der rotierenden Scheimpflugkamera (HR Pentacam; Oculus) bei Messungen der zentralen und dünnsten Hornhautdicke [17][*Jahadi et al*, 2010].

Die Glykoproteine des Stromas, Keratansulfat (ca. 65 %), Chondroitinsulfat und Dermatansulfat haben primär hydrophile Eigenschaften [15][*Seiler*, 2000].

Die Summe aller Bindungskräfte zwischen Keratozyten, Kollagenfasern und Glykoproteinen führt zu einer vollständigen Stabilisierung des Kollagennetzwerkes, das dem Korneastroma einen besonders hohen Grad an mechanischer Belastbarkeit und Reißfestigkeit verleiht [15][*Seiler*, 2000].

- Descemet-Membran

Sie stellt die Basalmembran des Endothels dar und hat eine Dicke von etwa  $10 \mu\text{m}$ . Sie ist aus Kollagen Typ IV, Laminin und Fibronectin zusammengesetzt und kann unter Spannung reißen [18][*Fitch et al*, 1990], [19][*Fujikawa et al*, 1981].

- Hornhautendothel

Die einschichtige Endothelzellschicht belegt die hintere Oberfläche der Descemet-Membran. Sie besteht aus gleichförmigen, hexagonalen Zellen mit einer Dicke von  $5 \mu\text{m}$  und einer Breite von  $20 \mu\text{m}$  [7][*Cornea*, 2005]. Das Endothel hat eine Barrierefunktion, die mittels „*Tight Junctions*“ und „*Gap Junctions*“ das Eindringen von Wasser und löslichen Stoffen in das hydrophile Hornhautstroma begrenzt [15][*Seiler*, 2000].

- Dua-Schicht

Im Mai 2013 haben *Dua et al* [20] gezeigt, dass eine sechste Schicht zwischen Stroma und Descemet-Membran (Dua-Schicht) vorliegt. Es geht um eine gut-definierte, azelluläre, feste Prä-Descemet-Schicht, die aus fünf bis acht Lamellen vom Kollagen Typ I besteht. Eine solche Erkenntnis wäre von enormer Bedeutung für Operationen am hinteren Teil der Hornhaut hinsichtlich der Biomechanik der Hornhaut sowie für pathologische Situationen wie akuter Hydrops, Descemetozele und Prä-Descemet-Dystrophien.

Jedoch erhoben manche Autoren gegen diese Behauptung von *Dua* Widerspruch. *McKee et al* (Mai 2014) [21] schrieben diesbezüglich: „*Wir nehmen mit Skepsis die neueste Behauptung zur Kenntnis, wonach eine neue Hornhautschicht entdeckt worden sei. Die Existenz von stromalem Prä-Descemet-Gewebe, welches nach einer Pneumodissektion verbleibt, ist bereits bekannt. Die weiteren Untersuchungen dieses Prä-Descemet-Gewebes bestätigen, dass es sich um Stroma und nicht um eine neue Schicht der Hornhaut handelt.*“

Derzeit scheinen die wissenschaftlichen Meinungen weltweit noch auseinanderzugehen, ob die Dua-Schicht tatsächlich eine neue Schicht der Hornhaut darstellt.

## 1.2 Biomechanik der Hornhaut

Die Biomechanik stellt oft das Bindeglied zwischen anatomischem bzw. morphologischem Aufbau und der physiologischen Funktion des biologischen Gewebes dar. Ziel der Biomechanik ist die Erklärung physiologischer wie auch pathologischer Zustände sowie die Vorausbestimmung der Wirkung therapeutischer Verfahren. Therapieverfahren erzielen nur bei bekanntem Dosis-Wirkungs-Verhältnis gute Ergebnisse, d. h. für die refraktive Hornhautchirurgie sind Kenntnisse der mechanischen Faktoren erforderlich, um gezielt die Form der Hornhaut nach chirurgischen Eingriffen vorhersagen zu können.

Zur Beschreibung der Effekte der refraktiven Chirurgie an der Hornhaut sollen einige Grundbegriffe erläutert werden:

Die Spannung ( $\sigma$ ) ist die auf einen Querschnitt (A) bezogene Kraft (F):



$$\sigma = \frac{F}{A}$$

Die Dehnung ( $\varepsilon$ ) ist die auf der Originallänge ( $l_0$ ) bezogene Längenänderung ( $\Delta l$ ):

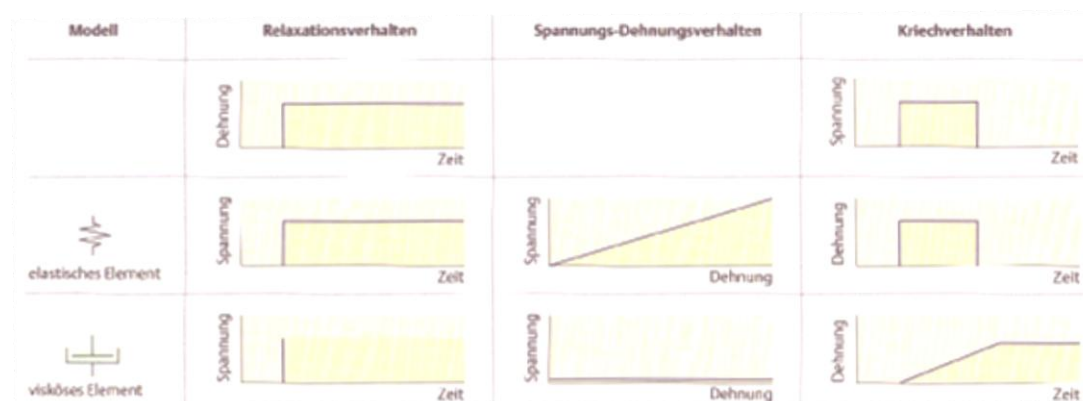
$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$$

Ein Material kann, so *Seiler* [22], nach einer Krafteinwirkung eine der wie folgt beschriebenen Verhaltensweisen aufzeigen:

Linear-elastisches Verhalten: Die Spannungs- und Dehnungswerte liegen auf einer geraden Linie und nach Entfernung der Last kehrt das Material wieder in den Originalzustand zurück. Die Elastizität eines Materials kann durch das Elastizitätsmodul (E-Modul) charakterisiert werden (Abbildung 4). Elastizitätsmodul ist die Steigung der Spannungs-Dehnungsgeraden.

Nichtlinear-elastisches Verhalten: Der Zusammenhang zwischen Spannung und Dehnung ergibt keine gerade Linie, sondern eine exponentielle Kurve (Abbildung 4).

Nichtlinear-viskoelastisches Verhalten: Es zeigt sich ein zeitabhängiges Spannungs- und Dehnungsverhalten. Die Spannungs-Dehnungskurve verläuft nichtlinear und die Belastungs- und Entlastungskurven sind unterschiedlich (Hysterese).



**Abbildung 4:** Spannungs-Dehnungsmodelle  
(T. Seiler, *Refraktive Chirurgie der Hornhaut*, 2000, S. 59, mit freundlicher Genehmigung von Thieme Verlag)

Die meisten biologischen Gewebe zeigen ein nichtlinear-viskoelastisches Deformationsverhalten, d. h. das Elastizitätsmodul nimmt mit steigender Spannung zu.

Die menschliche Hornhaut besteht, wie oben genannt, aus übereinanderliegenden und miteinander verwobenen Lamellen. Das Elastizitätsmodul der Kollagenfibrillen ist etwa tausendmal kleiner als das der Grundsubstanz [23][*Scott, 1988*]. Dieser strukturelle Aufbau hat eine Anisotropie zur Folge, mit hin auch eine Richtungsabhängigkeit des Elastizitätsmoduls. Tangential zur Hornhautoberfläche wird das Elastizitätsmodul vorwiegend von den Kollagenfasern bestimmt und senkrecht zur Oberfläche von der Grundsubstanz. Diese Struktur bedingt auch, dass die gesamte Hornhaut ein nichtlinear-viskoelastisches Verhalten zeigt. Bei geringen Belastungen, z. B. im physiologischen Druckbereich, ist sie elastisch, d. h. es tritt kein Fließen auf. So kann die Hornhaut auf Spannungsschwankungen oder äußere Kräfte leicht mit einer Formveränderung reagieren. Bei höheren Spannungen sind die Kollagenfasern gestreckt und eine Formveränderung ist nur noch unter großen Spannungsänderungen erreichbar [22][*Seiler, 2000*].

Für die mechanische Stabilität der Hornhaut ist vorwiegend das Stroma mit einer zentralen Dicke von 450  $\mu\text{m}$  (90 % der Gesamtdicke) verantwortlich, da die 10  $\mu\text{m}$  dicke Bowman-Schicht (etwa 2 % der Hornhautdicke) und die Descemet-Membran keinen wesentlichen Beitrag liefern [24][*Jue et al, 1986*].

Die Festigkeit des Hornhautstromas ist nicht gleichmäßig über die Dicke verteilt. *Park* und Mitarbeiter fanden heraus [25][*Park et al, 1995*], dass die Hornhaut im vorderen Teil etwa 25 % fester ist als im hinteren Teil. Dieser Unterschied lässt sich anhand des strukturellen Aufbaus erklären. Die Lamellenschichten in der vorderen Hornhaut sind stärker miteinander verwoben und lassen sich dadurch auch schwerer trennen [26][*Radner et al, 1996*]. Im Gegensatz dazu verlaufen die Schichten im hinteren Stroma streng lamellär und eine Trennung lässt sich leichter durchführen. Das hintere Stroma ist auch wasserreicher und quillt daher stärker. Mit steigendem Wassergehalt nimmt das Elastizitätsmodul ab. *Reichel* und Mitarbeiter [27] forschten an zentralen und peripheren Hornhautstreifen und stellten durch Bestimmung des E-Moduls fest, dass die Hornhaut peripher steifer als im Zentrum ist.

Das Interesse an der Biomechanik der Hornhaut ist parallel mit der Entwicklung von neuen operativen Methoden für refraktive Chirurgie zunehmend gestiegen. Die Messungen der biomechanischen Eigenschaften der Hornhaut *in vivo* sind aufgrund der Komplexität des viskoelastischen, biomechanischen Verhaltens der Hornhaut nur begrenzt möglich. Heutzutage stehen zwei neue Systeme zur klinischen Anwendung zur Verfügung: der *Ocular Response Analyzer* (Reichert Technologies, 2005), ein dynamisches bidirektionales Applanations-Messgerät und der *Corvis ST* (Oculus Optikgeräte GmbH), ein dynamisches Scheimpflug-Analyse-Messgerät. Diese Geräte sind im klinischen Alltag sehr hilfreich, insbesondere bei der Planung von Hornhauteingriffen sowie für die Früherkennung von Ektasien. Derzeit sind jedoch weitere Untersuchungen erforderlich, um feststellen zu können, ob die klinischen Messungen dieser zwei Messgeräte mit den bekannten mechanischen Eigenschaften der Hornhaut korrelieren [28][Piñero et al, 2014].

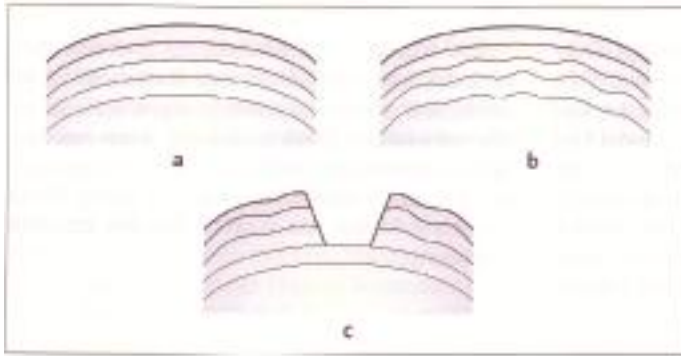
Messungen mit dem *Ocular Response Analyzer* zeigen einen Elastizitätskoeffizienten ( $K_e$ , *elasticity coefficient*) von 11,05 für die gesunde Hornhaut, 4,91 für Keratokonus und 5,99 für eine Hornhaut nach *laser in situ keratomileusis* (LASIK) [28][Piñero et al, 2014].

Messungen mit dem *Corvis ST* zeigen eine Dicke der zentralen Hornhaut von  $556,33 \pm 33,13 \mu\text{m}$  (Mittelwert  $\pm$  SD) [29][Nemeth et al, 2013].

### Einfluss der Hydratation auf das biomechanische Verhalten der Hornhaut

Das viskoelastische Verhalten der Hornhaut hängt sehr stark vom Wassergehalt ab. Mit steigender Hydratation nimmt die Dicke zu und dabei verringert sich das Elastizitätsmodul [22][Seiler, 2000].

Mit steigender Hydratation werden die hinteren Lamellen lockerer und die Spannung verschiebt sich nach vorn (Abbildung 5). Werden die vorderen Lamellen durchtrennt, verlagert sich die Spannung auf die hinteren Lamellen. Nimmt dann die Hydratation zu, dehnt sich die Hornhaut und flacht stärker ab. Damit kann auch die vorübergehende Überkorrektur unmittelbar nach einer radiären Keratotomie als Folge des Hydratationseffektes durch hypoosmotische Lösungen erklärt werden [22][Seiler, 2000].



**Abbildung 5:** Der Einfluss der Hydratation auf die Spannungsverteilung in der Hornhaut (T. Seiler, Refraktive Chirurgie der Hornhaut, 2000, S. 64, mit freundlicher Genehmigung von Thieme Verlag)

Chirurgische Eingriffe an der Struktur der Hornhaut bewirken Veränderungen der Hornhautform, die dann in der Folge auch die refraktiv-optischen Eigenschaften der Hornhaut verändern. Die komplexen Eigenschaften der Hornhaut können nur in einem solchen Modell erfasst und verarbeitet werden, das räumliche Verteilungen der biomechanischen Parameter zulässt. Ein solches Modell ist das „*Finite-Elemente-Modell*“ (FEM). Der Grundgedanke des FEM ist die Darstellung von irregulär-geformten Objekten durch eine Vielzahl kleiner, genau definierter Elemente, die sich einfacher analysieren lassen. Für die kleinen Elemente werden leicht analysierbare Formen gewählt (Quader), die homogen sind und deren Verhalten unter Kraffteinwirkung bekannt ist. Die Computersimulation erlaubt auch eine präzise Analyse bezüglich Inzisionstiefe und Inzisionslänge, die am lebenden Modell nicht durchgeführt werden kann [30][Hanna et al, 1992]. So diskutierten Hanna et al (1992) anhand einer Parameterstudie die Wertigkeit verschiedener Einflussfaktoren auf die Brechkraftänderung bei Keratotomie [31][Hanna et al, 1992], [32][Vito et al, 1992]. Sie gelangten dabei zu folgenden Ergebnissen:

- Eine dünne Hornhaut flacht stärker ab als eine dickere.
- Die Inzisionstiefe sollte mindestens  $2/3$  der Hornhautdicke betragen, um einen signifikanten Effekt zu erreichen. Dabei sind die Bowman-Schicht und das vordere Stroma durchzutrennen. Eine intrastromale Inzision allein z. B. mit dem Nd:YAG-Laser bewirkt keine Abflachung der Hornhaut [33][Sawusch et al, 1992]. Durch die Keratotomie einer x-prozentigen Tiefe der Hornhautdicke wird (durch die Inzision) der last-

tragende Querschnitt der Hornhaut verkleinert und nachfolgend muss die Zugkraft von der Dicke der Restgewebe  $(100 - x) \%$  aufgenommen werden. Diese größere Spannung führt zu einer Dehnung und Abflachung. Bei einer Inzisionstiefe von 90 % nimmt die Spannung auf das Zehnfache der normalen Spannung zu und verursacht eine Dehnung des Gewebes von 3,4 %, die sich aufgrund des viskoelastischen Verhaltens der Hornhaut mindestens noch verdoppelt [34][Seiler, 1988].

- Je geringer das E-Modul, desto größer werden die Korrekturen. *Hanna* [31] konnte an einem Dreischichtenmodell, bei dem die vordere Schicht ein um 50 % größeres E-Modul und die hintere Schicht ein um 50 % kleineres E-Modul als die mittlere Schicht besaß, aufzeigen, dass größere Änderungen erreicht werden als beim isotropen Modell. An der Basis der Inzision ist demnach die Spannung sehr groß.

### **1.3 Die korneale Wundheilung nach keratorefraktiven Eingriffen bzw. Verletzungen**

Die Antwort der Hornhaut auf mechanische Durchtrennung ihrer Komponenten (Hornhautinzision) hängt von dem Ausmaß des verletzten Gewebes und der Platzierung der Wunde ab.

Direkt nach der Inzision entfernen sich die Wundränder voneinander. Die Exposition an Tränenflüssigkeit führt zur Schwellung des hydrophilen Stromas und somit zu einer Abdichtung von kleineren Inzisionen.

Eine scheinbar zelluläre Inaktivitätsperiode (latente Phase) folgt, während derer sich das Zellskelett und die intrazellulären Verbindungen modulieren. Benachbarte intakte Zellen stellen ihren biochemischen Apparat um mit der Folge, dass Proteine und elektrische Signale generiert werden. Die Signale aktivieren entfernter gelegene Zellen, die in Richtung der Wunde einwandern. Darüber hinaus produzieren diese Zellen provisorische Proteine der extrazellulären Matrix (ECM) [35][Crosson *et al*, 1986].

Die Epithelzellen reagieren als erste (innerhalb der ersten zwei bis 12 Stunden) und migrieren an einer neuen Fibronektinschicht entlang (die sich über die Stromaränder gebildet hat), bis sich die Wundränder wieder vereinigen.

gen. Sobald die Oberfläche der Wunde komplett mit ein bis zwei Schichten von Epithelzellen gedeckt ist [36][*Gipson et al, 1977*] und das Stroma von der Umgebung geschützt ist (Verminderung der Infektionsgefahr), stellen die Epithelzellen die normale Hornhautdicke und Kontur wieder her [37][*Ebato et al, 1988*]. Durch das Trauma der Stromalen Keratozyten werden die intakten Keratozyten in der Umgebung der Wunde (etwa 200 µm an beiden Seiten der Wunde) ebenfalls aktiviert sodass eine weitere Zellmigration folgt.

Die Keratozytenantwort erfolgt wesentlich langsamer als die der Epithelzellen und kann zudem wesentlich länger andauern. Am Anfang migrieren die Keratozyten diffus, mithin ohne bestimmte Ordnung. Daraufhin folgt die Sekretion von Kollagen und Glykoproteinen zur Wiederherstellung der Struktur. In der ersten Woche nach der Verletzung entstehen einzelne Kollagenbündel zwischen den Fibroblasten, während sich in der dritten Woche ein dichtes Fibrillennetzwerk mit teils paralleler Ausrichtung und teils ohne konkrete Ausrichtung zeigt. Vier Monate nach dem Trauma zeigt sich noch kein konkretes Muster der Kollagenausrichtung; gleichwohl ist etwa ab dem zweiten Jahr das lamelläre Kollagenmuster wiederhergestellt, wenn auch mit kürzeren und enger beieinanderliegenden Lamellen. Das neue Kollagen hat dabei einen größeren Durchmesser als das ursprüngliche [38][*Matsuda et al, 1973*], [39][*Birk et al, 1984*], [40][*Cintron et al, 1978*] und die neuen Glykoproteine haben eine höhere Bindungsaffinität zu Wasser [41][*Hassel et al, 1983*], sodass die Homogenität, die für die Lichttransmission erforderlich ist, in der provisorischen Matrix nicht vorhanden ist.

In späteren Stadien der Wundheilung entwickeln die Keratozyten Muskelzell-Eigenschaften (intrazelluläres Aktin) und wirken wie kontrahierbare Elemente (Myofibroblasten oder Fibromyoblasten). Die Kontraktion der Hornhautwunde kann dadurch zu einer Astigmatismusänderung führen [42][*Garana et al, 1992*].

Im weiteren Verlauf wird die provisorische Matrix durch Matrix-Metalloproteinasen katabolisiert [43][*Fini et al, 1990*] und neues Kollagen und Glykoproteine mit ähnlichen Eigenschaften zu den ursprünglichen nativen (Proportion, Orientierung, Quantität) angelegt [44][*Tuft et al, 1993*]. Die Myofibroblasten kehren zu der anfänglichen Keratozyten-Situation zurück. Nach diesem Modulierungsprozess hat die Narbe eine normale Epitheldicke

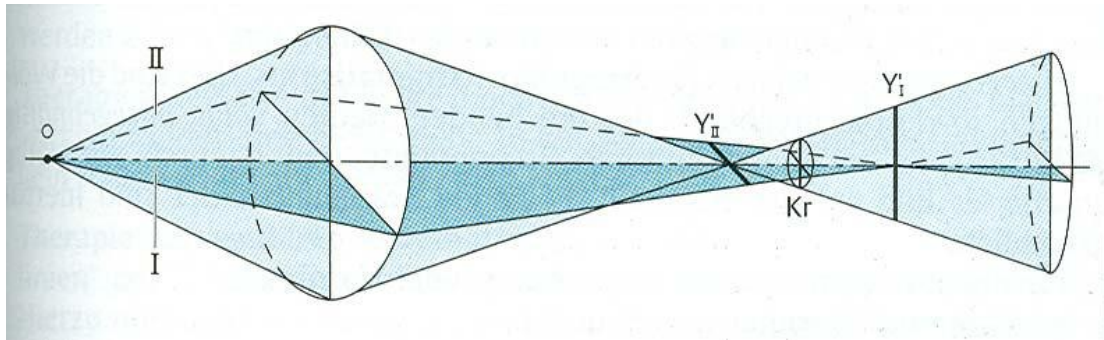
und die extrazelluläre Matrix besteht aus nativ-ähnlichen Komponenten. Das endgültige Gewebe hat eine höhere Zellzahl, ist aber dennoch nicht in gleichem Maße robust wie eine intakte Hornhaut [45][*Cornea*, 2005].

So führen nichtadaptierte Schnitte der Hornhaut zu einer vollständigen Vernarbung der Hornhautinzision von den hinteren Anteilen Richtung vordere Anteile des Schnittes. Durch den langsamen Abbau wird der epitheliale Pfropf vom hinteren Wundrand aus durch die induzierte Bildung von Narbengewebe im hinteren Anteil des Schnittes ersetzt.

#### **1.4 Astigmatismus-Erzeugung**

Definition: Bei Astigmatismus (aus dem Griechischen: A = nicht + *STIGMA* = Punkt, d. h. Brennpunktlosigkeit) eines optischen Abbildungssystems besteht eine Krümmungsanomalie der brechenden Medien, sodass parallel einfallende Lichtstrahlen nicht zu einem Punkt vereinigt, sondern zu einer Linie auseinandergezogen werden [46][*Lang*, 2004].

Pathophysiologie: Die brechenden Medien des astigmatischen Auges sind nicht sphärisch (kugelförmig), sondern brechen in einem Meridian anders als in dem dazu senkrechten Meridian. Es existieren deshalb zwei „Brennpunkte“. So wird ein punktförmiges Objekt (O) im Brennpunkt des ersten Meridians (I) als scharfer Stab ( $Y'_1$ ), gleichzeitig jedoch im Brennpunkt des dazu senkrechten Meridians (II) auch als ein um  $90^\circ$  verdrehter Stab ( $Y'_2$ ) abgebildet. In der Mitte dieser beiden „Brennlinien“ befindet sich der „Kreis kleinster Verwirrung“ (Kr). Dieser bezeichnet den Ort, an dem die Abbildung in allen Richtungen gleich stark verzerrt erscheint, mithin den Ort mit der geringsten Unschärfe der Abbildung (Abbildung 6).



**Abbildung 6:** Der Kreis kleinster Verwirrung  
(G. Lang, Augenheilkunde, 3., vollst. überarb. Aufl. 2004, S. 475, mit freundlicher Genehmigung von Thieme Verlag)

Bei der o. g. Darstellung wird davon ausgegangen, dass es sich um einen regulären Astigmatismus handelt, bei dem nur zwei Hauptschnitte (Meridiane) existieren, die annähernd senkrecht zueinander stehen.

Einteilung: Der reguläre Astigmatismus kann nach der Lage des stärker brechenden Meridians (Hauptschnitt) eingeteilt werden [46][Lang, 2004]:

Der Astigmatismus rectus („mit der Regel“) kommt am häufigsten vor. Der stärker brechende Meridian steht hierbei senkrecht (zwischen  $70^\circ$  und  $110^\circ$ ).

Beim Astigmatismus inversus („gegen die Regel“) liegt der stärker brechende Meridian waagrecht (zwischen  $160^\circ$  und  $20^\circ$ ).

Astigmatismus obliquus: Der stärker brechende Meridian liegt schräg (zwischen  $20^\circ$  und  $70^\circ$  oder  $110^\circ$  und  $160^\circ$ ).

Vom regulären Astigmatismus ist der irreguläre Astigmatismus abzugrenzen. Hier sind die Wölbungen sowie die Brechkraft der brechenden Medien unregelmäßig. Es entstehen multiple Brennpunkte und dadurch ein unscharfes Bild auf der Netzhaut.

Der Gesamtastigmatismus des Auges setzt sich aus dem jeweiligen Einzelastigmatismus der brechenden Medien zusammen:

- Hornhautvorderfläche
- Hornhaurückfläche
- Linsenvorderfläche
- Linsenrückfläche



## 1.5 Astigmatismus-Epidemiologie

Der Astigmatismus ist ein weit verbreiteter Refraktionsfehler und nimmt einen Anteil von etwa 13 % aller Refraktionsfehler ein [47][Porter et al, 2001]. Es besteht eine altersabhängige Verteilung des Astigmatismus mit häufigstem Auftreten (etwa 20 %) in den ersten Lebensmonaten, in denen eine sehr steile Hornhautkrümmung zu beobachten ist [48][Howland et al, 1985]. Die Studienlage ist allerdings unterschiedlich im Hinblick auf die Frage, ob der Astigmatismus in dieser Altersgruppe eher „mit der Regel“ oder „gegen die Regel“ ausgerichtet ist [48][Howland et al, 1985], [49][Friling et al, 2004].

Im ersten Lebensjahr wurde an etwa 2/3 der untersuchten Augen ein Astigmatismus von 0,75 Dpt oder mehr beschrieben, bei 12-15 % von 2,0 Dpt oder mehr [50][Howland et al, 1978]. Mit zunehmendem Alter flacht die Hornhaut dann ab und die Prävalenz eines hohen Astigmatismus (> 1 Dpt) reduziert sich im Vorschulalter auf etwa 4,8 %. Es handelt sich meistens um einen Astigmatismus „mit der Regel“ [51][Atkinson et al, 1980], [52][Gwiazda et al, 1984].

Etwa 63 % der jungen Erwachsenen zwischen dem 20. und 30. Lebensjahr zeigen einen Astigmatismus von mehr als 0,25 Dpt; davon zeigt aber nur eine Minderheit Werte von mehr als 1 Dpt [53][Satterfield, 1989]. Nach dem 40. Lebensjahr zeichnet sich eine langsame Drehung der Astigmatismusachse von vorwiegend „mit der Regel“ zu vorwiegend „gegen die Regel“ ab, vermutlich aufgrund von Veränderungen der kornealen Krümmung [54][Fledelius et al, 1986].

Der Astigmatismus zeigt ebenfalls eine rassenabhängige Verteilung. Einige Volksgruppen scheinen eine höhere Prävalenz zu zeigen. Die ostasiatische Bevölkerung zeigt eine relativ hohe Prävalenz, die unter Umständen mit der größeren Lidspannung und der engeren Lidspalte der asiatischen Augenform zusammenhängt. Eine prospektive Studie von Tong und seinen Mitarbeitern zeigte, dass 19,3 % der Kinder in Singapur einen Astigmatismus von mehr als 1 Dpt aufweisen [55][Tong et al, 2004]. In China wurde ebenfalls unter Kindern im Vorschulalter eine Prävalenz von 21,1 % festgestellt, während sich im Verlauf in vielen Fällen ein Gleichbleiben oder sogar eine Zunahme des Astigmatismus zeigte [56][Fan et al, 2004]. Die Ureinwohner Amerikas ereilt hin-

sichtlich der erhöhten Prävalenz von Astigmatismus von mehr als 1 Dpt dasselbe Schicksal. Zu Volksgruppen mit hoher Astigmatismusprävalenz werden darüber hinaus die Bevölkerung spanischen Ursprungs und die Ureinwohner in Brasilien gezählt [57][*Harvey et al, 2006*], [58][*Kleinstei et al, 2003*].

## 1.6 Astigmatismuskorrektur im Rahmen der Kataraktoperation

Die Kataraktoperation bietet dem Patienten eine einmalige Gelegenheit, neben der Beseitigung der Linsentrübung zusätzlich auch den vorliegenden astigmatischen Brechkraftfehler des Auges mit nur einem Eingriff korrigieren zu lassen. Bevorzugt wird die Korrektur des astigmatischen Fehlers des Auges während der Kataraktoperation, zumal dem Patienten dadurch ein zweiter Eingriff erspart bleiben kann.

Bei ca. 50 % der Patienten über 60 Jahren liegt ein Astigmatismus von mehr als 1,0 Dpt vor [59][*Vitale et al, 2008*]. *Hoffer* [4] berichtet, dass 1.770 von 7.500 Patienten (23,6 %), die sich einer Kataraktoperation unterzogen, haben einen kornealen Astigmatismus höher als 1,5 Dpt aufgewiesen. *Ninn-Pedersen et al* [60] zeigten, dass der Astigmatismus bei bis zu 22 % der für eine Kataraktoperation in Betracht kommenden Patienten mehr als 1,5 Dpt betrug. *Hoffmann und Hütz* stellten ferner fest, dass 8 % von 23.239 Augen einen kornealen Astigmatismus von mehr als 2,0 Dpt und 2,6 % von mehr als 3,0 Dpt aufwiesen [61][*Hoffmann et al, 2010*].

Ein postoperativer kornealer Restastigmatismus von mehr als 0,75 Dpt kann die unkorrigierte Sehschärfe verschlechtern und Symptome wie Trübung und Hallos hervorrufen [62][*Nichamin, 2006*]. Astigmatismus von 1-2 Dpt kann eine Abnahme der unkorrigierten Sehschärfe auf 0,6 bis 0,4 (Snellen, Dezimal) bewirken, während ein Astigmatismus von 2-3 Dpt zu einer Abnahme der unkorrigierten Sehschärfe auf 0,2 (Snellen, Dezimal) führen kann [63][*Duke-Elder et al, 1970*].

Während der Kataraktoperation bieten sich bei Patienten mit signifikantem präoperativem Astigmatismus folgende Verfahren an, um den Astigmatismus zu reduzieren:

- Die Hauptinzision der Operation kann auf dem steilen Meridian der Hornhaut (Operieren „auf Achse“) positioniert und entsprechend durchgeführt werden, um die gewünschte Abflachung der Hornhaut und somit eine Astigmatismusreduktion zu bewirken [64][*Koch et al*, 1999]. Der abflachende Effekt ist von der Größe und der Positionierung der Hauptinzision abhängig. Je breiter der Hauptschnitt ist und je zentraler er liegt, desto größer wird der abflachende Effekt. Ein Hauptschnitt, der so konstruiert wird, dass er teilweise senkrecht verläuft, führt zu einer größeren Abflachung der Hornhaut [65][*Thornton*, 1994]. Dieses Verfahren ist jedoch mit logistischen Schwierigkeiten verbunden, darunter sowohl mit einer ständigen Änderung der Positionierung des Operateurs und des Instrumentierungstisches um den Operationstisch herum als auch mit einer ungünstigen Händepositionierung des Operateurs. Zudem erweist sich dieses Verfahren nur bei relativ kleinen Astigmatismusbeträgen als effektiv [66][*Nichamin*].

- Aus den o. g. Gründen wird das Operieren „auf Achse“ durch eine fest – meist temporal – positionierte Hauptinzision ersetzt. Inzisionen kleiner als 3 mm sind prinzipiell astigmatismusneutral [67][*Masket et al*, 1996], [68][*Kohnen et al*, 1995], [69][*Pfleger et al*, 1996] und werden mit limbusparallelen Hornhautrelaxationsinzisionen oder mit der Implantation einer torischen Intraokularlinse kombiniert. *Kaufmann et al* (2005) [70] stellten fest, dass temporal gelegene Hauptinzisionen, welche mit limbalen Relaxationsinzisionen kombiniert werden, bessere astigmatismusreduzierende Ergebnisse erzielen als beim Operieren „auf Achse“.

- *Lever und Dehan* (2000) [71] schlugen die Durchführung von „*opposite Clear-Cornea*“ Inzisionen für die Astigmatismusreduktion vor. Bei diesem Verfahren wird eine zweite penetrierende Inzision direkt gegenüber der Hauptinzision der Kataraktoperation gesetzt, sodass sie auf dem steilen Meridian der Hornhaut in einem Winkel von 180° zur Hauptinzision liegt. Dieses Verfahren

ist technisch einfach und erfordert keine zusätzlichen Instrumente. Es liegt damit jedoch eine zweite wesentliche Inzision vor, welche das Risiko einer Leckage oder Infektion erhöhen könnte. Des Weiteren sind schräge Inzisionen für einen gewissen Grad an Bogenlänge nicht so effektiv wie konventionelle senkrechte Relaxationsinzisionen [72][*Nichamin, 2001*], [65][*Thornton, 1994*]. Mit den „*opposite Clear-Cornea*“ Inzisionen kann eine Reduktion des präoperativen Astigmatismus um ca. 0,5 bis 1,5 Dpt erreicht werden, wenn sie mit Operieren auf dem steilen Meridian kombiniert werden [73][*Bazzazi et al, 2008*], [74][*Nemeth et al, 2014*], [75][*Razmjoo et al, 2014*], [76][*Khokhar et al, 2006*].

- Mit „*Bioptics*“ kann der postoperative sphärische und astigmatische Refraktionsfehler korrigiert werden, wobei eine LASIK Behandlung ca. sechs Wochen nach der durchgeführten Kataraktoperation erfolgt.
- Die konduktive Keratoplastik ist auch eine Methode, die für die Korrektur einer Resthyperopie und eines hyperopen Restastigmatismus nach Kataraktoperation angewandt werden könnte, sich in der Praxis jedoch nicht durchgesetzt hat.

Die am häufigsten durchgeführten Methoden zur Astigmatismuskorrektur im Rahmen der modernen Kataraktchirurgie sind zum einen die limbusparallelen Hornhautrelaxationsinzisionen und zum anderen die Implantation von torischen Intraokularlinsen. Beide Verfahren werden im folgenden ausführlich erläutert.

### 1.7 Limbusparallele astigmatismuskorrigierende Hornhautinzisionen

Wenn man sich mit den limbalen Relaxationsinzisionen (LRI) befasst, sollte zuerst die Nomenklatur klargestellt werden. Obwohl der Terminus LRI (aus dem Englischen: „*limbal relaxing incision*“) weltweit häufig verwendet wird, handelt es sich in Wirklichkeit nicht um Inzisionen, die direkt am Limbus gesetzt werden. Es wird also nicht eine „Limbotomie“ beschrieben, sondern zirkumlimbale Inzisionen an der peripheren Hornhaut. Im Allgemeinen ist es nicht erwünscht, den anatomischen Limbus zu inzidieren, da in diesem Fall erst die Konjunktiva und die Tenon inzidiert werden müssten. Solche Inzisionen sind wesentlich unangenehmer für den Patienten und zeigen eine größere Tendenz zur Blutung und zur postoperativen Dehiszenz. Demzufolge wird für diese limbusparallelen astigmatismuskorrigierenden Hornhautinzisionen der von *Dr. Miller K.* und *Dr. Olson R.* vorgeschlagene Terminus „Periphere Clear-Cornea-Relaxationsinzisionen“ (PCCRI) verwendet [77][*Miller, 2003*], [78][*Olson, 2003*]. Im Allgemeinen hat es sich durchgesetzt, Inzisionen in der Zone von  $\leq 8$  mm als astigmatische Keratotomien (AK) und jene in der Zone von  $> 9$  mm als periphere korneale Relaxationsinzisionen zu bezeichnen [79][*Cornea, 2011*].

Mitte der 80er Jahre des vorigen Jahrhunderts kam die Idee auf, die astigmatismuskorrigierenden Hornhautinzisionen in die Kataraktchirurgie zu integrieren [80][*Osher et al, 1992*]. Über Jahre wurden diese Inzisionen in der zentralen optischen Zone (eine optische Zone von ca. 7 mm) gesetzt. Trotz ihrer Wirksamkeit waren diese zentral gelegenen Keratotomien mit dem erhöhten Risiko verbunden, einen irregulären Astigmatismus zu verursachen. Im Laufe der Zeit wurde die Verschiebung dieser Inzisionen in die äußere Peripherie der Hornhaut von vielen Autoren empfohlen [81][*Budak et al, 1998*]. Die nun „limbusparallelen“ genannten Relaxationsinzisionen (LRI oder PCCRI) erwiesen sich als weniger aufwendig und zeigten eine astigmatische Reduktion bis maximal 3-4 Dpt [82][*Cornea, 2005*].

Prinzip der PCCRI ist, ein Paar bogenförmiger Inzisionen an gegenüberliegenden Stellen der peripheren Hornhaut durchzuführen. Die Inzisionen

werden an dem steilen Meridian gesetzt und verursachen sowohl eine Abflachung des steilen [83][Rowsey et al, 1996] als auch gleichzeitig eine Versteilung des 90° senkrecht dazu liegenden Meridians [84][Thornton, 1990]. Dieses Phänomen wird als „*coupling Effect*“ bezeichnet. Die „*coupling Ratio*“ beschreibt die Abflachung der Hornhaut im Bereich des Inzisionsmeridians gegenüber der Versteilung senkrecht dazu (und wird in Dpt ausgedrückt). Bei der PCCRI ist die „*coupling Ratio*“ 1:1, d. h., dass der Effekt in beiden Meridianen gleich ausfällt [85][Nichamin, 2003]. Dadurch bleibt das sphärische Äquivalent der Brechkraft des Auges unverändert und es wird insbesondere bei gleichzeitiger Astigmatismuskorrektur im Rahmen einer Kataraktoperation keine Anpassung der Dioptrienstärke der berechneten Intraokularlinse (IOL) notwendig.

Thornton (1992) beschrieb den geometrischen Vorteil der bogenförmigen Inzisionen damit, dass eine echte 1:1 „*coupling Ratio*“ nur erfolgen kann, wenn die Zirkumferenz der Hornhaut unverändert bleibt, was lediglich mit konzentrischen bogenförmigen Inzisionen möglich ist. Gerade Inzisionen bewirken eine Zunahme der gesamten Zirkumferenz der Hornhaut sowie eine Abflachung der gesamten Hornhaut, sodass eine Anpassung der Stärke der Intraokularlinse notwendig wird. Eine kürzere bogenförmige Inzision bewirkt darüber hinaus den gleichen Effekt wie eine längere gerade Hornhautinzision [86][Thornton, 1992].

### Patientenselektion

Eine genaue Patientenauswahl ist besonders wichtig, um postoperative Überraschungen und unzufriedene Patienten zu vermeiden. Durch eine ausführliche Anamnese und eine genaue präoperative klinische Untersuchung (z. B. „*break-up time*“) sollen Patienten mit Problemen der Augenoberfläche (wie beim Sjögren-Syndrom) identifiziert werden und von der Durchführung von Keratotomien ausgeschlossen werden. Keratotomien an Patienten mit trockenem Auge können, wahrscheinlich aufgrund der Durchtrennung von kornealen Nerven und der darauffolgenden Abnahme der Hornhautsensibilität, das Trockenheitsgefühl verschlechtern. Eine Hornhauttopographie kann mit dem Erkennen dezenter Pathologien der Hornhaut wie z. B. eines Keratokonus

„*forme fruste*“ oder eines feinen irregulären Astigmatismus hilfreich sein und so eine kontraindizierte Anwendung von PCCRI vermeiden.

Die meisten Autoren sind sich einig, dass ein Restastigmatismus „mit der Regel“ den Kreis kleinster Verwirrung vergrößern und infolge die Tiefenschärfe erhöhen würde. Manche Autoren streben einen milden Restastigmatismus „mit der Regel“ (zumindest bei monofokalen Implantaten) als postoperative Zielrefraktion an. Erklärt wird dies dadurch, dass sich bei den meisten Patienten der Astigmatismus mit der Zeit in Richtung „gegen die Regel“ verändert. Zudem soll ein „mit der Regel“ Restastigmatismus die unkorrigierte Fernsicht begünstigen, da die meisten Stimuli eine senkrechte Form haben [87][Novis, 2000]. Im Gegensatz dazu wird in anderen Publikationen [88][Porter et al, 2008], [89][Verzella et al, 1993], [90][Trindade et al, 1997] vertreten, dass Patienten mit einem leichten postoperativen Astigmatismus „gegen die Regel“ einen höheren pseudoakkommodativen Effekt mit verbessertem Nahvisus nachweisen. Diesbezüglich sind weitere Studien erforderlich, um aufzuklären, welche Form eines postoperativen Restastigmatismus zu bevorzugen ist.

Bei der präoperativen Planung sollte jedoch auch der Status des Partnerauges berücksichtigt werden. In dem Falle beispielsweise, in dem am Partnerauge ein hoher Astigmatismus vorliegt und keine operative Maßnahme für dieses Auge vorgesehen ist, kann von astigmatismuskorrigierenden Maßnahmen an dem zu operierenden Auge Abstand zu nehmen sein.

### Präoperative Planung

Bei der chirurgischen Astigmatismuskorrektur ist es von großer Bedeutung, die Stärke und die genaue Lokalisation des zu korrigierenden Zylinders zu bestimmen. Nicht selten zeigt sich in der Praxis, dass verschiedene Methoden bei den präoperativen Messungen (Refraktion, Keratometrie, Topographie) zu unterschiedlichen Ergebnissen führen. Der lentikuläre Astigmatismus kann teilweise der Grund für diese Abweichung sein. Allerdings spielt der lentikuläre Astigmatismus bei der Astigmatismuskorrektur im Rahmen der Kataraktchirurgie keine Rolle. Die klassische Keratometrie berechnet nur zwei

Punkte auf jedem Meridian, diese wiederum auf einer einzigen optischen Zone von ca. 3 mm. Für die präoperative Bestimmung des Astigmatismus ist deshalb, insbesondere wenn die anderen Messungen voneinander abweichen oder in komplizierten Fällen, die korneale Topographie notwendig.

Der Effekt der astigmatismuskorrigierenden Inzisionen ist von mehreren Faktoren abhängig. Sowohl das Alter und das Geschlecht der Patienten als auch die Lage, die Anzahl, die Länge und die Tiefe der Inzisionen spielen eine Rolle [91][Gills, 2003].

Die Tiefe der Inzisionen variiert unter den Operateuren. Manche führen Inzisionen von ca. 90 % der Hornhautdicke durch, wobei die Tiefe der Inzisionen entsprechend der Hornhautdicke angepasst wird. Andere hingegen bevorzugen eine standardisierte, empirisch ermittelte Inzisionstiefe von 600 µm [66][Nichamin], da angeblich die pachymetrische Anpassung der Inzisionstiefe bei älterer Bevölkerung im Gegensatz zu jüngeren Kandidaten nur einen minimalen Gewinn bringt. Zumal die Hornhaut bei Letzteren dicker ist, erscheint die Anpassung der Inzisionstiefe erforderlich.

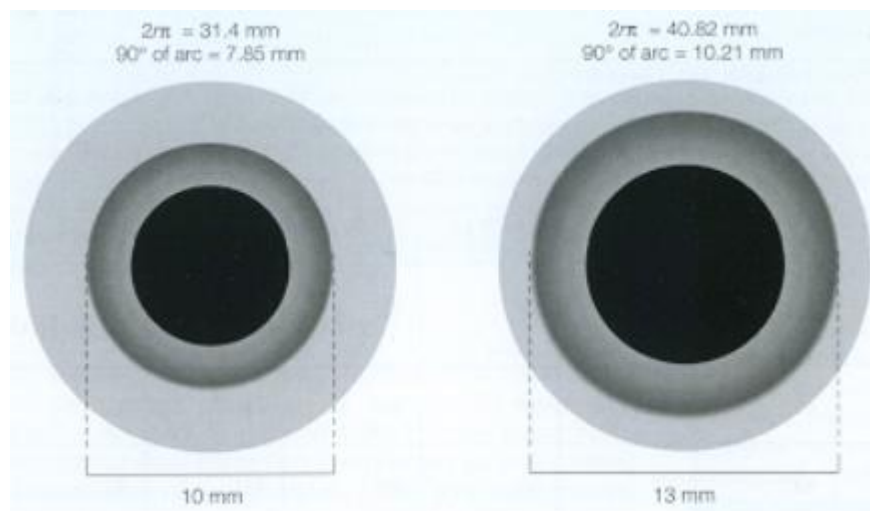
Ist die Stärke des zu korrigierenden Astigmatismus präoperativ bestimmt worden, dann werden von den meisten Chirurgen Nomogramme angewandt (z. B. Abbildung 7), die die o. g. Faktoren berücksichtigen und so eine individuellere Planung der Inzisionen erlauben [92][McDonnell, 1999].



Intralimbal relaxing Incision Nomogram for modern phaco surgery Empiric blade-depth setting of 600 microns ( $\mu\text{m}$ ) <i>Louis D. 'Skip' Nichamin, M.D. ~ Laurel Eye Clinic, Brookville, PA</i>							
<b>Spherical</b>							
(up to $+0.75 \times 90$ or $+0.50 \times 180$ )							
<b>Incision design</b>	'Neutral' temporal clear corneal incision (i.e. 3.5 mm. or less, single plane, just anterior to vascular arcade)						
<b>Against-the-rule</b>							
<b>(Steep axis <math>0-44^\circ/136-180^\circ</math>)</b>							
<b>Pre-op cylinder</b>	<b>Paired incisions in degrees of arc*</b>						
	<b>30-40 yr old</b>	<b>41-50 yr old</b>	<b>51-60 yr old</b>	<b>61-70 yr old</b>	<b>71-80 yr old</b>	<b>81-90 yr old</b>	<b>91+ yr old</b>
Nasal limbal arc only*						35°	
+0.75 to +1.25	55°	50°	45°	40°	35°		
+1.50 to +2.00	70°	65°	60°	55°	45°	40°	35°
+2.25 to +2.75	90°	80°	70°	60°	50°	45°	40°
+3.00 to +3.75	90°	90°	85°	70°	60°	50°	45°
	o.z = 8 mm	o.z. = 9 mm					
<b>Incision design</b>	The temporal incision, if greater than $40^\circ$ of arc, is made by first creating a two-plane, grooved phaco incision (600 $\mu\text{m}$ depth), which is then extended to the appropriate arc length at the conclusion of surgery.						
<b>With-the-rule</b>							
<b>(Steep axis <math>45-135^\circ</math>)</b>							
<b>Pre-op cylinder</b>	<b>Paired incisions in degrees of arc</b>						
	<b>30-40 yr old</b>	<b>41-50 yr old</b>	<b>51-60 yr old</b>	<b>61-70 yr old</b>	<b>71-80 yr old</b>	<b>81-90 yr old</b>	<b>91+ yr old</b>
+1.00 to +1.50	50°	45°	40°	35°	30°		
+1.75 to +2.25	60°	55°	50°	45°	40°	35°	30°
+2.50 to +3.00	70°	65°	60°	55°	50°	45°	40°
+3.25 to +3.75	80°	75°	70°	65°	60°	55°	45°
<b>Incision design</b>	'Neutral' temporal clear corneal incision along with the following peripheral arcuate incisions						
When placing intralimbal relaxing incisions following or concomitant with radial relaxing incisions, total arc length is decreased by 50%.							

**Abbildung 7:** Das Nichamin-Nomogramm für periphere korneale Inzisionen (*Krachmer et al, Cornea, 3. Aufl. 2011, S. 1901, Urheberrechtshaber: Elsevier*)

Die Länge der Inzision wird dabei in Grad definiert, zumal Inzisionsbögen gleichen Grades eine unterschiedliche Länge in mm haben können, wenn der Hornhautdurchmesser unterschiedlich groß ist. Zum Beispiel hat – wie in Abbildung 8 dargestellt – eine Inzision von 90° bei einer Hornhaut mit einem Durchmesser von 10 mm eine Länge von 7,85 mm, während eine Inzision von 90° bei einer Hornhaut mit einem Durchmesser von 13 mm eine Länge von 10,21 mm hat. Eine präoperative Festlegung auf Millimeter würde daher zu einer Über- oder Unterkorrektur des Astigmatismus führen, wenn der Durchmesser der Hornhaut – wie abgebildet – ungewöhnlich klein oder groß ist (Abbildung 8).



**Abbildung 8:** Die Diskrepanz der Inzisionslänge in mm festgelegt zwischen einer kleinen und einer großen Hornhaut

Die Bestimmung der Inzisionslänge in Grad (°) ist unabhängig von der Größe der Hornhaut (Krachmer *et al*, Cornea, 2. Aufl. 2005, S. 2026, Urheberrechtshaber: Elsevier)

Ist eine Behandlung mit radiären Keratotomien bereits erfolgt, sollte die Länge der PCCRI auf ca. 50 % reduziert werden. In Fällen, in denen signifikante Keratotomie-Eingriffe bereits durchgeführt wurden, ist es ratsam, von zusätzlichen Hornhautinzisionen Abstand zu nehmen [66][Nichamin].

Die PCCRI können beliebig entweder am Anfang oder am Ende der Kataraktoperation durchgeführt werden. Viele Operateure führen die Relaxationsinzisionen bevorzugt am Ende der Operation durch, weil im Falle einer Komplikation durch die PCCRI die Hauptinzision der Operation modifiziert

werden müsste. In Routinefällen werden die PCCRI jedoch zu Beginn der Operation durchgeführt. Eine Ausnahme liegt im Falle eines hohen präoperativen Astigmatismus „gegen die Regel“ vor, wobei gemäß Nomogramm eine temporale Relaxationsinzision länger als  $40^\circ$  gesetzt werden muss. Der temporale Bogen der Relaxationsinzision und die Hauptinzision der Kataraktoperation überschneiden sich, wenn die Relaxationsinzision zu Beginn der Operation durchgeführt wird. Dies könnte durch die intraoperativen Manipulationen zu einer signifikanten Kluft und einem Ödem der Wunde führen. In diesem Fall wird zuerst die temporale Hauptinzision zweistufig gesetzt. Nach der Implantation der Intraokularlinse und vor der Absaugung von Viskoelastikum, was zur Folge hat, dass der Bulbus tonisiert ist, werden die Relaxationsinzisionen gemäß Nomogramm auf die geplante volle Länge erweitert.

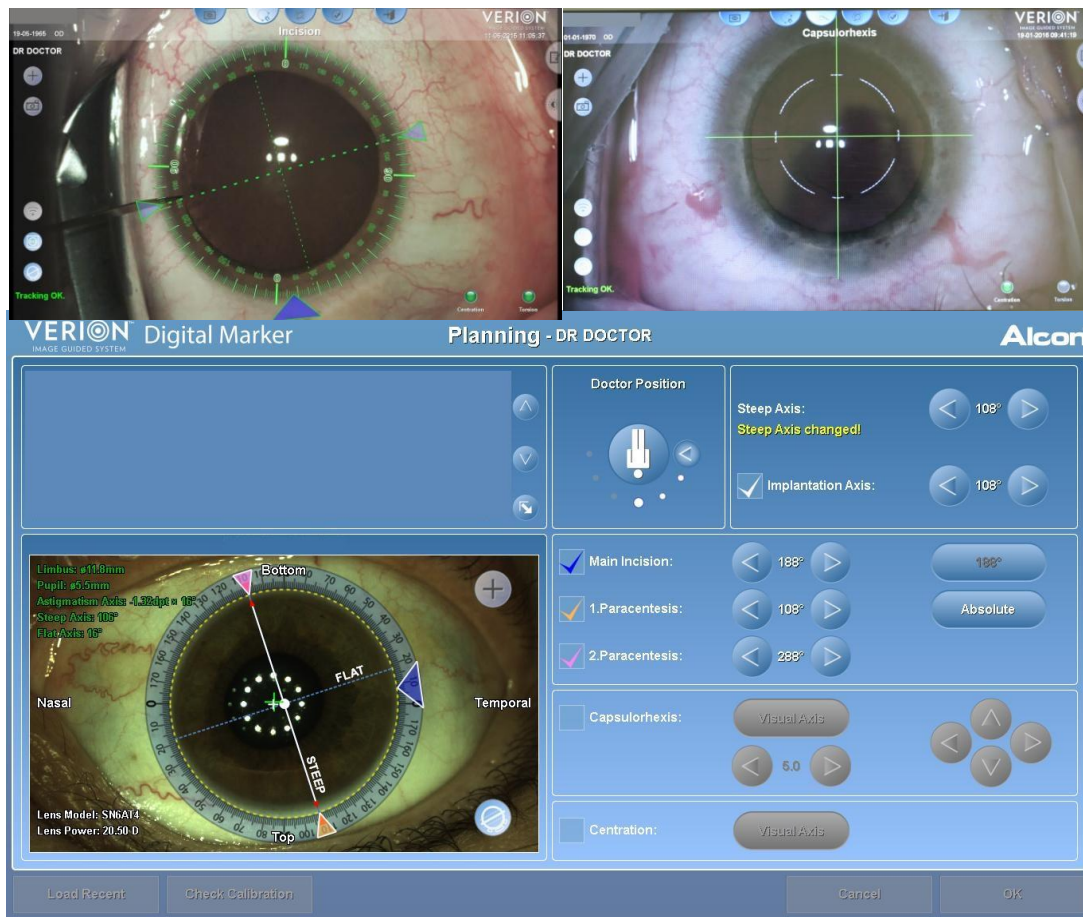
Wenn die temporale Relaxationsinzision zuerst aufgesetzt wird, wird der Hauptschnitt der Operation so durchgeführt, dass die Klinge des Keratoms nach unten zu dem äußeren oder posterioren Rand der Relaxationsinzision gedrückt wird. Die Klinge ist sodann in die Relaxationsinzision auf eine Ebene parallel zur Iris zu führen. Diese Winkelung führt zu einer Dissektion des Gewebes inmitten des Stromas und gewährleistet eine ausreichende Länge des Tunnels und dadurch eine spontane Abdichtung des Hauptschnittes [66][*Nichamin*].

Es werden unterschiedliche Methoden angewandt, um eine fehlerhafte Positionierung der Inzisionen zu vermeiden. Die meisten Operateure bevorzugen eine Markierung der Hornhaut präoperativ beim aufrechten Patienten. Diese Markierung kann auf 6 und 12 Uhr am Limbus [66][*Nichamin*] auf 3 und 9 Uhr oder auf der steilen Achse der Hornhaut gesetzt werden. Eine derartige Markierung ist insbesondere bei retrobulbärer Anästhesie besonders wichtig, da es zu einer unvorhersehbaren Rotation des Bulbus kommen kann. *Kohnen et al* (2007) [93] zeigten in einer Serie von 40 Augen, dass beim Wechsel von der sitzenden in die liegende Position 70 % der rechten Augen eine Inzyklorotation und 70 % der linken Augen eine Exzyklorotation von bis zu  $11^\circ$  aufwiesen. *Swami et al* (2002) [94] fanden ebenso heraus, dass 8 % der Augen (20/240) eine Rotation von mehr als  $10^\circ$  beim Wechsel von der sitzenden in die liegende Position zeigten. Gemäß dem Euler-Theorem verursacht eine Achsverdrehung der Astigmatismuskorrektur von  $5^\circ$ ,  $10^\circ$  oder  $15^\circ$ , eine 17-,

33- oder 50- prozentige Reduktion des chirurgischen Effektes [95][*Duke-Elder et al, 1970*]. Diese Markierungen werden während der Operation verwendet, um die Achse des steilen Meridians zu bestimmen.

Eine andere Option ist es, eine intraoperative Keratoskopie oder Keratometrie durchzuführen, um den steilen Meridian und die Stärke des Astigmatismus intraoperativ festzustellen.

Mittlerweile haben sich Eye-Tracking-Systeme (z. B. *Verion Digital Marker*, Fa. Alcon) entwickelt und im operativen Alltag etabliert. Bei diesen Systemen wird ein hochauflösendes, digitales Referenzbild des Patientenauges, insbesondere mit skleralen Blutgefäßen, Limbus und Orientierungspunkten auf der Iris, präoperativ aufgenommen. Dieses Bild, vergleichbar mit einem Fingerabdruck, ist optimiert für das intraoperative Erkennen und Nachverfolgen des Auges während der gesamten Behandlung und bildet die visuelle Referenz für Inzisionen, Kapsulorhexis und IOL-Positionierung. Nach der Datenübertragung des Operationsplans auf das Operationsmikroskop gleicht die Bildverarbeitungssoftware die Strukturen des zu behandelnden Auges mit dem präoperativen Bild ab, ordnet die digitalen Markierungen eindeutig zu und sorgt für das Eye-Tracking während der Behandlung. Die Einspielung verschiedener Overlays ins Operationsmikroskop verbunden mit dem intraoperativen Echtzeit-Tracking des Patientenauges ermöglicht eine erhöhte Präzision: eine Anzeige der geplanten Inzisionen und der Kapsulorhexis, Zentrierungshilfe für multifokale IOL und das Overlay zur Ausrichtung torischer IOL [96].



**Abbildung 9:** Das Eye-Tracking-System Verion Digital Marker der Firma Alcon: präoperative Planung und intraoperative Bilder (St. Vincentius Augenklinik der Vincentius-Diakonissen-Kliniken gAG, Karlsruhe, Deutschland)

Es ist wichtig, bei der Durchführung der Inzision das Messer senkrecht zu der Hornhautoberfläche zu halten, sodass eine konstante Tiefe der Inzision erreicht wird. Die Unterstützung des Handgelenks ist empfehlenswert. Das Messer sollte so gehalten werden, als würde man einen Pfeil werfen, sodass das Instrument zwischen dem Daumen und dem Zeigefinger während der Durchführung der Inzision rotieren kann. Das führt zu einer glatten Inzisionskontur. Typischerweise wird die rechte Hand für Inzisionen auf der rechten Seite des Auges benutzt und die linke Hand für Inzisionen auf der linken Seite. In den meisten Fällen ist es ratsam, bei der Durchführung der Inzision die Klinge an sich heranzuziehen und nicht etwa von sich wegzuführen. Eine leicht befeuchtete Hornhautoberfläche hilft, epitheliale Erosionen zu vermei-

den, kann jedoch verhindern, eine unabsichtliche Perforation rechtzeitig zu erkennen [66][*Nichamin*].

### Komplikationen

PCCRI sind im Vergleich zu zentraler liegenden kornealen Inzisionen sicherer für die Astigmatismuskorrektur. Wie bei jedem operativen Verfahren kann es jedoch auch hier zu Komplikationen kommen. Die Positionierung der Inzisionen im falschen Meridian ist dabei der am häufigsten auftretende operative Fehler [82][*Cornea*, 2005]. Weitere Komplikationen, welche besonders häufig auftreten, werden im Folgenden dargestellt:

### Mögliche Komplikationen durch Keratotomien

1. Überkorrektur/ Unterkorrektur
2. Infektion
3. Perforation
4. Erosio des Hornhautepithels
5. Irregulärer Astigmatismus
6. Achsenverdrehung
7. Operieren auf dem falschen Meridian
8. Abnahme der Hornhautsensibilität
9. Störendes Fremdkörpergefühl
10. Wunddehiszenz
11. Abnahme der Bulbusstabilität gegenüber Verletzungen

## 1.8 Torische intraokulare Linsen – Einleitung

Seit Einführung der Kataraktextraktion Mitte des 17. Jahrhunderts war es lange Zeit für jeden Ophthalmochirurgen undenkbar, Emmetropie bei seinen Kataraktpatienten zu erzielen. Dafür wäre die Korrektur von Myopie, Hyperopie sowie des Astigmatismus erforderlich gewesen. Erst ca. vierzig Jahre nach der ersten erfolgreichen Implantation einer sphärischen Intraokularlinse (1949) kam die Idee auf, eine Astigmatismuskorrektur durch die Intraokularlinsenimplantation mit durchzuführen.

### Bisherige Modelle

Die erste torische Intraokularlinse (IOL) wurde in Japan von *Kimiya Shimizu* produziert. Es handelte sich um eine dreiteilige Polymethylmethacrylat-Linse (PMMA-Linse) mit einem Durchmesser von 13,0 mm und C-Schlaufenhaptiken sowie einer zusätzlichen torischen Addition auf der 5,5 mm x 6,5 mm ovalen Optik. Die torische Optik wurde in zwei Stärken von +2,0 Dpt und +3,0 Dpt hergestellt. Diese dreiteilige IOL zeigten jedoch eine Rotationstendenz von mehr als 20° zur Zielachse in etwa 30 % der Fälle. Die Linsenrotation wurde vermutlich durch die Kapselkontraktion verursacht [97][*Shimizu et al*, 1992], [98][*Shimizu et al*, 1994].

Zur selben Zeit, mithin im Jahre 1992, wurde auch die erste Implantation einer torischen IOL in Nordamerika durchgeführt. Es handelte sich um die STAAR® Linse (Abbildung 10), eine faltbare torische IOL mit Plattenhaptiken aus Silikon. Die rechteckige Konfiguration der Plattenhaptiken mit einem Durchmesser von 10,5 mm zeigte dabei eine Rotationsstabilität von über 90 % [99][*Sanders et al*, 1992].



**Abbildung 10:** Die AA4203TF torische IOL der Firma STAAR® (mit freundlicher Genehmigung von STAAR Surgical)

Im weiteren Verlauf wurde eine neue Version der STAAR<sup>®</sup> Linse mit einem Durchmesser von 10,8 mm hergestellt. Die torische Korrektur betrug 2,25 Dpt auf der Vorderfläche der IOL und konnte etwa 1,25 Dpt des refraktiven Astigmatismus ausgleichen. Linienförmige Markierungen auf der Optikperipherie sollen die Achse der torischen Korrektur kennzeichnen und so bei der Beurteilung der Achse der torischen IOL postoperativ helfen. Kleine Öffnungen an der Haptikperipherie sollten zudem die Migration von fibrotischen Linsenepithelzellen durch und um die Öffnung herum erlauben, sodass gemäß dem Hersteller eine zusätzliche fibrotische Fixierung der Linse erfolgen kann.

Die FDA-Zulassungsstudie der torischen STAAR<sup>®</sup> Linse legte dar, dass die 10,8 mm torische IOL innerhalb von 30° um die Zielachse in 94 % der Fälle verblieb. Da die IOL postoperativ rotierte, zeigte sich, dass die Linse mit 10,8 mm Durchmesser zu klein für den Kapselsack war. Weitere Studien zeigten eine positive Korrelation zwischen der postoperativen Rotation einer torischen IOL sowohl mit einem größeren Kapselsack als auch mit einer kleineren Achsenlänge [100][*Ruhswurm et al, 2000*].

Aktuell gibt es folgende Modelle torischer monofokaler IOL:

Firma Rayner (Rayner Intraocular Lenses Ltd., Hove, East Sussex, Vereinigtes Königreich)

Die torische Intraokularlinse RayOne<sup>®</sup> (Abbildung 11) ist nach Angaben des Herstellers eine asphärische, faltbare, vorgeladene einteilige Linse aus hydrophilem Akrylat. Der gesamte Durchmesser der Linse beträgt 12,5 mm; der Durchmesser der Optik beträgt 6 mm. Die torische Oberfläche liegt auf der Rückfläche der Linse. Es sind sphärische Werte von +8,0 Dpt bis +30,0 Dpt in Schritten von 0,5 Dpt und torische Additionen von +1,0 Dpt bis +6,0 Dpt in Schritten von 0,5 Dpt verfügbar. Auf Bestellung sind sphärische Additionen von -9,5 Dpt bis +34,5 Dpt und torische Additionen von +1,0 Dpt bis +11,0 Dpt zur individuellen Anfertigung möglich. Die RayOne<sup>®</sup> wird endokapsulär implantiert.





**Abbildung 11:** RayOne® asphärische torische IOL der Firma Rayner (mit freundlicher Genehmigung von Rayner)

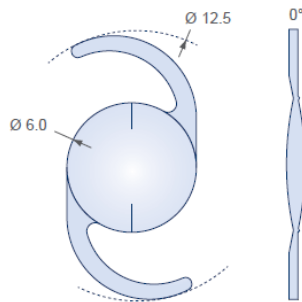
Die torische Intraokularlinse T-flex® (573T bzw. 623T) (Abbildung 12) ist nach Angaben des Herstellers eine asphärische, faltbare, einteilige Linse aus hydrophilem Akrylat. Der gesamte Durchmesser der Linse beträgt 12,0 für die 573T und 12,5 mm für die 623T; der Durchmesser der Optik beträgt 5,75 mm für die 573T und 6,25 mm für die 623T. Die torische Oberfläche liegt auf der Vorderfläche der Linse. Es sind sphärische Werte von +6,0 Dpt bis +30,0 Dpt in Schritten von 0,5 Dpt und torische Additionen von +1,0 Dpt bis +6,0 Dpt in Schritten von 0,5 Dpt verfügbar. Auf Bestellung sind sphärische Additionen von -10,0 Dpt bis +35,0 Dpt und torische Additionen von +1,0 Dpt bis +11,0 Dpt zur individuellen Anfertigung möglich. Die T-flex® wird endokapsulär implantiert.



**Abbildung 12:** Die T-flex® asphärische torische IOL der Firma Rayner (mit freundlicher Genehmigung von Rayner)

Humanoptics (ehemals Dr. Schmidt Intraokularlinsen) (Humanoptics AG, Erlangen, Deutschland)

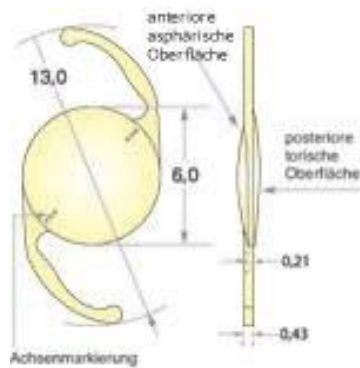
Die torische Intraokularlinse TORICA<sup>®</sup>-aA (MC 6125 T) bzw. TORICA<sup>®</sup>-aAY YELLOW (MC 6125 T-Y) (Abbildung 13) ist laut Hersteller eine faltbare, einteilige Linse aus hydrophilem Akrylat mit C-Schlaufenhaptiken. Der Gesamtdurchmesser der Linse beläuft sich auf 12,5 mm, der Durchmesser der Optik beträgt 6 mm. Die torische Oberfläche liegt auf der Vorderfläche der Linse. Der sphärische Wert reicht von -20,0 Dpt bis +40,0 Dpt und der torische Wert von +1,0 Dpt bis +20,0 Dpt ist jeweils in Schritten von 0,5 Dpt verfügbar.



**Abbildung 13:** Die TORICA<sup>®</sup>-aA (MC 6125 T) der Firma Humanoptics (mit freundlicher Genehmigung von Humanoptics)

Firma Alcon (Alcon Labs, Fort Worth, Texas, Vereinigte Staaten)

Die torische Intraokularlinse ACRYSOFF<sup>®</sup> IQ Toric SN6ATT (Abbildung 14) ist laut Hersteller eine bikonvexe, faltbare, einteilige Blaufilterlinse aus hydrophobem Acrylat. Der gesamte Durchmesser der Linse beträgt 13 mm, der Durchmesser der Optik 6 mm. Die torische Oberfläche liegt auf der Rückfläche der Linse. Der sphärische Wert ist von +6,0 Dpt bis +30,0 Dpt in 0,5 Dpt Schritten und von +31,0 Dpt bis +34,0 Dpt in 1,0 Dpt Schritten und der torische Wert von +1,5 Dpt (SN60T3) bis +6,0 Dpt (SN60T9) in 0,75 Dpt Schritten verfügbar. Die torische ACRYSOFF<sup>®</sup> IOL wird endokapsulär implantiert.



Modell	Zylinderstärke auf IOL Ebene (Dpt)	Zylinderstärke auf Hornhautebene (Dpt)
SN6AT3	1,50	1,03
SN6AT4	2,25	1,55
SN6AT5	3,00	2,06
SN6AT6	3,75	2,57
SN6AT7	4,50	3,08
SN6AT8	5,25	3,60
SN6AT9	6,00	4,11

**Abbildung 14:** Die ACRYSOFF<sup>®</sup> IQ SN6ATT torische IOL der Firma Alcon (© Alcon)

#### Firma Zeiss (Carl Zeiss AG, Oberkochen, Deutschland)

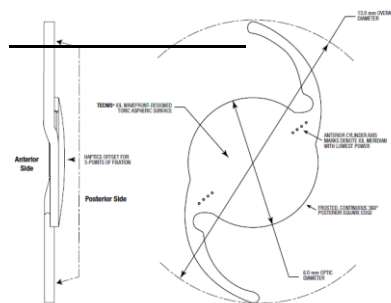
Bei der torischen Intraokularlinse AT TORBI<sup>®</sup> 709M/MP (Abbildung 15) handelt es sich nach Angaben des Herstellers um eine einteilige Intraokularlinse mit Plattenhaptiken und sie besteht aus hydrophilem Acrylat (25 %) mit hydrophober Oberfläche. Der gesamte Durchmesser der Linse liegt bei 11 mm und der Durchmesser der Optik beträgt 6 mm. Es handelt sich um eine bitorische asphärische Linse, da die Torik gleichmäßig auf beiden Seiten der Linse verteilt ist. Der sphärische Wert ist von -10,0 Dpt bis +32,0 Dpt und der torische Wert von +1,0 Dpt bis +12,0 Dpt jeweils in Schritten von 0,5 Dpt verfügbar. Die Linse von -10,0 bis +24,0 Dpt Sphäre mit +1,0 bis +4,0 Dpt Zylinder kann durch einen 1,8 mm (Viscoject<sup>™</sup>) bzw. durch einen 1,5 mm (AT.Shooter A2-2000/ACM2) breiten Schnitt implantiert werden. Die AT TORBI<sup>®</sup> 709M/MP wird endokapsulär implantiert.



**Abbildung 15:** Die AT TORBI<sup>®</sup> 709M/MP der Firma Zeiss (mit freundlicher Genehmigung von Zeiss)

Firma Johnson & Johnson (ehemals Abbott, ehemals AMO) (Johnson & Johnson Vision Care Inc., Santa Ana, Kalifornien, Vereinigte Staaten)

Die torische Intraokularlinse TECNIS® ZCT (Abbildung 16) ist laut Hersteller eine bikonvexe, faltbare, einteilige Linse aus hydrophobem Acrylat. Der gesamte Durchmesser der Linse liegt bei 13 mm, der Durchmesser der Optik bei 6 mm. Die torische Oberfläche liegt auf der Vorderfläche der Linse. Der sphärische Wert ist von +5,0 Dpt bis +34,0 Dpt in Schritten von 0,5 Dpt und die Torik in +1,5 Dpt, +2,25 Dpt, +3,0 Dpt, +4,0 Dpt, +4,5 Dpt, +5,25 Dpt und +6,0 Dpt verfügbar. Die TECNIS® ZCT wird endokapsulär implantiert.



**Abbildung 16:** Die TECNIS® ZCT torische IOL der Firma Abbott (Abbildungsquelle und Urheberrechtsinhaber: Johnson & Johnson)

Modell	Zylinderstärke auf IOL Ebene (Dpt)	Zylinderstärke auf Hornhautebene (Dpt)
ZCT150	1,50	1,03
ZCT225	2,25	1,54
ZCT300	3,00	2,06
ZCT400	4,00	2,74
ZCT450	4,50	3,08
ZCT525	5,25	3,60
ZCT600	6,00	4,11

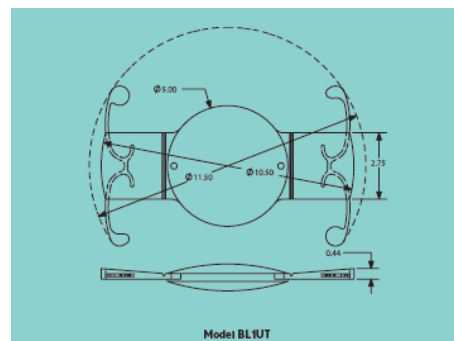
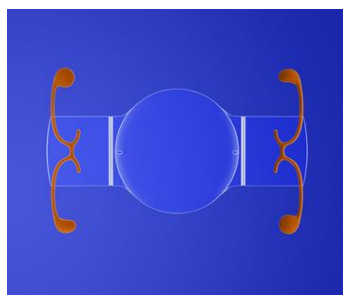
Firma Bausch + Lomb (Laval, Quebec, Canada)

Die torische Intraokularlinse enVista™ TORIC (Abbildung 17) ist nach Angaben des Herstellers eine bikonvexe, faltbare, einteilige Linse aus hydrophobem Acrylat. Der gesamte Durchmesser der Linse beträgt 12,5 mm und der Durchmesser der Optik liegt bei 6 mm. Der sphärische Wert ist von +6,0 Dpt bis +30,0 Dpt in 0,5 Dpt Schritten und der torische Wert von +1,25 Dpt bis +5,75 Dpt in 0,75 Dpt Schritten verfügbar. Die enVista™ TORIC wird endokapsulär implantiert.



**Abbildung 17:** Die enVista™ TORIC der Firma Bausch + Lomb  
(Urheberrechtsinhaber: Bausch + Lomb)

Die torische Intraokularlinse Trulign® Toric PB1UT (Abbildung 18) ist nach Angaben des Herstellers eine modifizierte Plattenhaptiklinse aus Silikon mit Schlaufenhaptiken aus Polyimid auf den Plattenhaptiken. Die Linse hat einen Gesamtdurchmesser von 11,5 mm, der Durchmesser der Optik beträgt 5 mm. Die torische Oberfläche liegt auf der Rückfläche der Linse. Der sphärische Wert ist von +10,0 Dpt bis +33,0 Dpt in 0,5 Dpt Schritten und der torische Wert in +1,25 Dpt, +2,0 Dpt und +2,75 Dpt verfügbar. Die Trulign® Toric Linse wird endokapsulär implantiert. Das spezielle Design der Linse verspricht eine verbesserte Sehschärfe im Nahbereich.



**Abbildung 18:** Die Trulign® Toric der Firma Bausch + Lomb  
(Urheberrechtsinhaber: Bausch + Lomb)

Firma Hoya (Hoya Medical Singapore Pte. Ltd., Singapur)

Die torische Intraokularlinse HOYA Vivinex™ XY1A Toric (Abbildung 19) ist nach Angaben des Herstellers eine Linse aus hydrophobem Acrylat mit C-Schlaufenhaptiken. Der gesamte Durchmesser der Linse ist 13,0 mm und der Durchmesser der Optik beträgt 6 mm. Die torische Oberfläche liegt auf der Rückfläche der Linse. Der sphärische Wert ist von +10,0 Dpt bis +30,0 Dpt in 0,5 Dpt Schritten und der torische Wert von +1,0 Dpt bis +6,0 Dpt (T2 bis T9) in 0,5 Dpt Schritten (T2 bis T3) bzw. 0,75 Dpt Schritten (T3 bis T9) verfügbar. Die Vivinex™ XY1A iSert® preloaded Toric ist vorgeladen und kann durch einen 1,7 mm breiten Schnitt implantiert werden. Die HOYA Vivinex™ XY1A Toric wird endokapsulär implantiert.



**Abbildung 19:** Die Vivinex™ XY1A bzw. Vivinex™ XY1A iSert® preloaded Toric der Firma Hoya  
(© HOYA Surgical Optics GmbH. Abbildung mit Genehmigung von HOYA Surgical Optics GmbH)

Firma Oculentis (Oculentis GmbH, Berlin, Deutschland)

Die torische Intraokularlinse Lentis® Comfort Toric LS-313 MF15 T1-T6 (Abbildung 20) ist nach Angaben des Herstellers eine vorgeladene, bikonvexe Linse aus hydrophilen Acrylaten mit hydrophob wirkender Oberfläche und Plattenhaptiken. Der gesamte Durchmesser der Linse liegt bei 11 mm und der Durchmesser der Optik beträgt 6 mm. Die torische Oberfläche liegt auf der Rückfläche der Linse. Die Vorderfläche der Linse ist mit einem segmentförmigen Nahanteil ausgestattet, welcher eine Nahaddition von +1,5 Dpt verspricht. Der sphärische Wert ist von +10,0 Dpt bis +30,0 Dpt in 0,5 Dpt Schritten und der torische Wert von +0,75 Dpt bis +5,25 Dpt in 0,75 Dpt Schritten verfügbar.

Die Lentis® Comfort Toric IOL wird durch einem 2,4 mm breiten Schnitt endokapsulär implantiert.

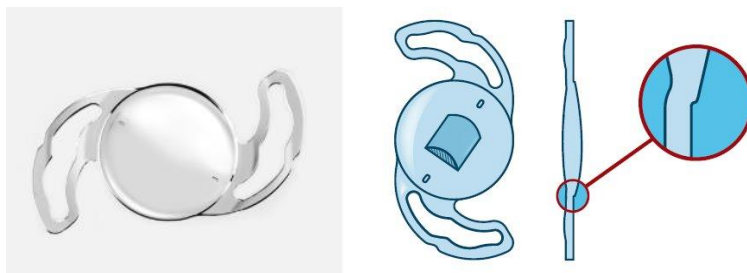
Mit dem Modell Lentis® Comfort Toric T Plus LU-313 T und TY bietet die Firma Oculentis eine individuelle Anfertigung der Intraokularlinse an.



**Abbildung 20:** Die Lentis® Comfort Toric der Firma Oculentis (mit freundlicher Genehmigung von Oculentis)

#### Firma Ophtec (Ophtec BV, Groningen, Niederlande)

Die torische Intraokularlinse 565 Precizon® Toric (Abbildung 21) ist nach Angaben des Herstellers eine bikonvexe, einteilige Linse aus hydrophilem Acrylat. Der gesamte Durchmesser der Linse beträgt 12,5 mm, der Durchmesser der Optik 6 mm. Die spezielle Konfiguration der leicht gebogenen Haptiken soll eine postoperative Rotationsstabilität der Linse begünstigen. Der sphärische Wert ist von +1,0 Dpt bis +34,0 Dpt in 0,5 Dpt Schritten und der torische Wert von +1,0 Dpt bis +10,0 Dpt in 0,5 Dpt Schritten verfügbar. Die Precizon® Toric wird durch einen 2,2 mm breiten Schnitt endokapsulär implantiert.



**Abbildung 21:** Die 565 Precizon® Toric der Firma Ophtec (mit freundlicher Genehmigung von Ophtec)

Firma Polytech-Domilens (Polytech-Domilens GmbH, Roßdorf, Deutschland)

Die torische Intraokularlinse DOMICRYL BIFLEX T Toric (Abbildung 22) ist laut Hersteller eine einteilige Linse aus hydrophob/ hydrophilem Copolymer. Der gesamte Durchmesser der Linse liegt bei 13,0 mm, der Durchmesser der Optik beträgt 6 mm. Die torische Oberfläche liegt auf der Rückfläche der Linse (ab 10 Dpt bitorisch). Der sphärische Wert ist von +5,0 Dpt bis +9,0 Dpt in 1,0 Dpt Schritten und von +10,0 Dpt bis +30,0 Dpt in 0,5 Dpt Schritten verfügbar. Der torische Wert ist in +1,0 Dpt, von +1,5 bis +10,0 Dpt in 0,75 Dpt Schritten und auf Anfrage von +11,0 Dpt bis +26,0 Dpt in 1,0 Dpt Schritten verfügbar. Die DOMICRYL BIFLEX T Toric wird durch 1,8 bzw. 2,2 breiten Schnitt endokapsulär implantiert.

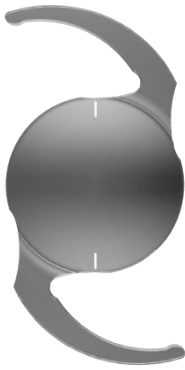


**Abbildung 22:** Die DOMICRYL BIFLEX T der Firma Polytech-Domilens (mit freundlicher Genehmigung von Polytech-Domilens)

Firma 1stQ (1stQ Deutschland GmbH & Co. KG, Mannheim, Deutschland)

Die torische Intraokularlinse Basis Z torisch (Abbildung 23) ist laut Hersteller eine faltbare, einteilige Linse aus hydrophilem Acrylat mit Z-Haptik. Die Linse verfügt über einen Gesamtdurchmesser von 13 mm; der Durchmesser der Optik liegt bei 6 mm. Der sphärische Wert ist von -10,0 Dpt bis +10,0 Dpt in 1,0 Dpt Schritten, von +11,0 Dpt bis +30,0 Dpt in 0,5 Dpt Schritten und von +31,0 Dpt bis +35,0 Dpt in 1,0 Dpt Schritten verfügbar. Der torische Wert ist von +1,5 bis +9,0 Dpt in 0,75 Dpt Schritten und von +10,0 Dpt bis +24,0 Dpt in 1,0 Dpt Schritten verfügbar (höher auf Anfrage). Die Basis Z wird endokapsulär implantiert.





**Abbildung 23:** Die Basis Z torisch der Firma 1stQ  
(mit freundlicher Genehmigung von 1st Q)

Die Intraokularlinse Basis V torisch (Abbildung 24) ist laut Hersteller eine vorgeladene, faltbare, einteilige Linse aus hydrophobem Acrylat. Die Linse verfügt über einen Gesamtdurchmesser von 13 mm; der Durchmesser der Optik liegt bei 6 mm. Der sphärische Wert ist von +10,0 Dpt bis +30,0 Dpt in 0,5 Dpt Schritten und der torische Wert von +1,0 bis +6,0 Dpt in 0,50 Dpt Schritten verfügbar (höher auf Anfrage). Die Basis V wird endokapsulär implantiert.

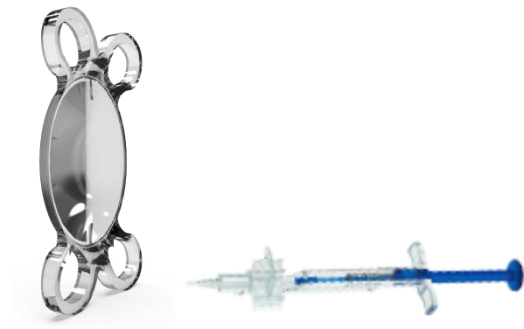


**Abbildung 24:** Die Basis V torisch der Firma 1stQ  
(mit freundlicher Genehmigung von 1st Q)

#### Firma Afidera (Afidera GmbH, Berlin, Deutschland)

Die torische Intraokularlinse ARTIS<sup>®</sup> T PL (Abbildung 25) ist nach Angaben des Herstellers eine vorgeladene, faltbare, einteilige Linse. Die Optik der Linse ist aus hydrophobem Acrylat hergestellt und hat ein Vierpunkthaptikdesign. Für sphärische Werte von +10,0 Dpt bis +25,0 Dpt beläuft sich der gesamte Durchmesser der Linse auf 10,79 mm und der

Durchmesser der Optik auf 6 mm, während für sphärische Werte von +25,5 Dpt bis +35,0 Dpt der gesamte Durchmesser 10,5 mm und der Durchmesser der Optik 5,8 mm beträgt. Die torische Oberfläche liegt auf der Rückfläche der Linse. Der sphärische Wert ist von +10,0 Dpt bis +35,0 Dpt in 0,5 Dpt Schritten und der torische Wert von +0,75 Dpt bis + 6,0 Dpt in 0,75 Dpt Schritten verfügbar. Die ARTIS<sup>®</sup> T PL wird endokapsulär implantiert.



**Abbildung 25:** Die ARTIS<sup>®</sup> T PL der Firma Afidera (Urheberrechtsinhaber: Cristalens Industrie)

Die torische Intraokularlinse SAL Toric (Abbildung 26) ist nach Angaben des Herstellers eine faltbare, einteilige Linse. Die Optik der Linse ist aus hydrophobem Acrylat mit Blaulichtfilter hergestellt. Die Linse verfügt über einen Gesamtdurchmesser von 13 mm; der Durchmesser der Optik liegt bei 6 mm. Die torische Oberfläche liegt auf der Vorderfläche der Linse. Der sphärische Wert ist von +1,0 Dpt bis +9,0 Dpt in 1,0 Dpt Schritten, von +10,0 Dpt bis +30,0 Dpt in 0,5 Dpt Schritten und der torische Wert von +1,0 Dpt bis + 6,0 Dpt in 0,5 Dpt Schritten verfügbar. Die SAL Toric wird endokapsulär implantiert.



**Abbildung 26:** Die SAL Toric der Firma Afidera (Urheberrechtsinhaber: MBI, Millennium Biomedical, Inc.)

Firma Argonoptics (Argonoptics GmbH, Haltern am See, Deutschland)

Die torische Intraokularlinse ALSAFIT TORIC VF (Abbildung 27) ist nach Angaben des Herstellers eine bikonvexe, faltbare, Linse aus hydrophobem und hydrophilem Acrylat mit Violett Filter und Plattenhaptiken. Der gesamte Durchmesser der Linse ist 11 mm und der Durchmesser der Optik beträgt 6 mm. Der sphärische Wert ist von 0 Dpt bis +32,0 Dpt in 0,5 Dpt Schritten und der torische Wert von +1,0 bis +6,0 Dpt in 0,5 Dpt Schritten verfügbar (höher auf Anfrage). Die ALSAFIT TORIC VF wird durch einen 1,8 mm bzw. 2,2 mm breiten Schnitt endokapsulär implantiert.



**Abbildung 27:** Die ALSAFIT TORIC VF der Firma Argonoptics  
(mit freundlicher Genehmigung von Argonoptics)

Firma Rück (Fritz Ruck Ophthalmologische Systeme GmbH, Eschweiler, Deutschland)

Die torische Intraokularlinse Acriva<sup>UD</sup> BB T UDM 611 (Abbildung 28) ist nach Angaben des Herstellers eine bikonvexe, faltbare, einteilige Blaufilterlinse aus hydrophilem Acrylat mit hydrophober Oberfläche und Plattenhaptiken. Der gesamte Durchmesser der Linse beträgt 11 mm, der Durchmesser der Optik 6 mm. Der sphärische Wert ist von 0 Dpt bis +27,0 Dpt in 0,5 Dpt Schritten und der torische Wert von +1,0 Dpt bis +6,0 Dpt in 0,5 Dpt Schritten verfügbar (individuelle Anfertigung nach Anfrage möglich). Die Acriva<sup>UD</sup> BB T UDM 611 wird durch einen 1,8 mm breiten Schnitt endokapsulär implantiert.



**Abbildung 28:** Die Acriva<sup>UD</sup> BB T UDM 611 der Firma Ruck  
(© HOYA Surgical Optics GmbH. Abbildung mit Genehmigung von HOYA Surgical Optics GmbH)

Firma IOL Expert (IOL expert GmbH & CO. KG, Bamberg, Deutschland)

Die torische Intraokularlinse Visiotis toric + (Abbildung 29) ist nach Angaben des Herstellers eine bikonvexe, faltbare, einteilige Intraokularlinse aus hydrophilem Acrylat mit hydrophober Oberfläche und Doppel-C-Schlaufenhaptiken. Der gesamte Durchmesser der Linse beträgt 12 mm, der Durchmesser der Optik 6 mm. Der sphärische Wert ist von +10,0 Dpt bis +30,0 Dpt in 0,5 Dpt Schritten und der torische Wert von +1,5 Dpt bis +5,25 Dpt in 0,75 Dpt Schritten verfügbar. Die Visiotis toric + wird endokapsulär implantiert.

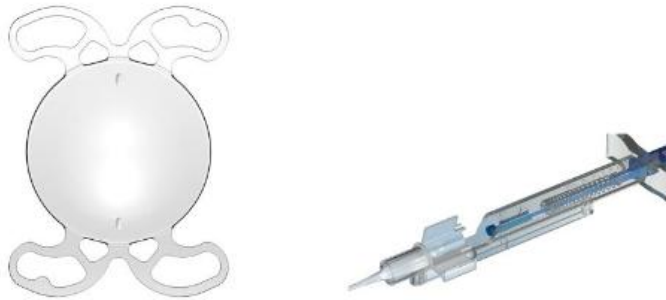


**Abbildung 29:** Die Visiotis toric + der Firma IOL Expert  
(mit freundlicher Genehmigung von IOL Expert)

Firma W2O (W2O Medizintechnik AG, Philippsburg, Deutschland)

Die torische Intraokularlinse MINI 4 Ready toric (Abbildung 30) ist nach Angaben des Herstellers eine vorgeladene, bikonvexe, faltbare, einteilige Intraokularlinse aus hydrophilem Acrylat mit hydrophober Oberfläche und 4-

Schlaufenhaptik. Die torische Oberfläche liegt auf der Rückfläche der Linse. Der gesamte Durchmesser der Linse beträgt 10,75 mm, der Durchmesser der Optik 6 mm. Der sphärische Wert ist von 0 Dpt bis +30,0 Dpt in 0,5 Dpt Schritten (ab +10,0 Dpt) und der torische Wert von +1,5 Dpt bis +4,5 Dpt in 0,5 Dpt Schritten verfügbar. Die MINI 4 Ready toric wird durch einen 1,8 mm breiten Schnitt endokapsulär implantiert.



**Abbildung 30:** Die MINI 4 Ready toric der Firma W2O (mit freundlicher Genehmigung von W2O)

Nachstehende Tabelle fasst die Charakteristika der gängigen monofokalen torischen IOL zusammen:

<b>Firma/ Modell</b>	<b>Material/ Konfiguration</b>	<b>Gesamter Durchmesser (mm)</b>	<b>Durchmesser der Optik (mm)</b>	<b>torische Fläche</b>	<b>Zylinder- Stärke (Dpt)</b>
<b>Rayner/ RayOne®</b>	Hydrophiles Acrylat/ C-Design	12,5	6,0	Rückfläche	+1,0 bis +11,0
<b>Rayner/ T-flex® 573T</b>	Hydrophiles Acrylat/ C-Design	12,0	5,75	Vorderfläche	+1,0 bis +11,0
<b>Rayner/ T-flex® 623T</b>	Hydrophiles Acrylat/ C-Design	12,5	6,25	Vorderfläche	+1,0 bis +11,0
<b>Humanoptic/ TORICA®- aA/aAY</b>	Hydrophiles Acrylat/ C-Schlaufen	12,5	6,0	Vorderfläche	+1,0 bis +20,0

<b>Alcon/ ACRYSOF® IQ SN6ATT</b>	Hydrophobes Acrylat/ C-Schlaufen	13,0	6,0	Rückfläche	+1,5 bis +6,0
<b>Zeiss/ AT TORBI® 709M/MP</b>	Hydrophiles Acrylat mit hydrophober Oberfläche/ Plattenhaptiken	11,0	6,0	beide Flä- chen	+1,0 bis +12,0
<b>Johnson &amp; Johnson/ TECNIS® ZCT</b>	Hydrophobes Acrylat/ C-Schlaufen	13,0	6,0	Vorderflä- che	+1,5 bis +6,0
<b>Bausch + Lomb/ enVista™ TORIC</b>	Hydrophobes Acrylat/ C-Schlaufen	12,5	6,0		+1,25 bis +5,75
<b>Bausch + Lomb/ Trulign®</b>	Silikon (Optik), Plattenhaptik aus Silikon mit Schlaufen- haptiken aus Polymide	11,5	5,0	Rückfläche	+1,25, +2,00, +2,75
<b>Hoya/ Vivonex™ XY1A/ iSert®</b>	Hydrophobes Acrylat/ C-Schlaufen	13,0	6,0	Rückfläche	+1,0 bis +6,0
<b>Oculentis/ Lentis® Com- fort</b>	Hydrophiles Acrylat mit hydrophober Oberfläche/ Plattenhaptiken	11,0	6,0	Rückfläche	+0,75 bis +5,25
<b>Opthec/ Precizon®</b>	Hydrophiles Acrylat/ C- Design	12,5	6,0		+1,0 bis +10,0
<b>Polytech- Domilens/ DOMICRYL BIFLEX T</b>	Hydrophob/ Hydrophiles Copolymer/ C-Design	13,0	6,0	Rückfläche	+1,0 bis +26,0
<b>1stQ/ Basis Z</b>	Hydrophiles Acrylat/ Z-Design	13,0	6,0		+1,5 bis +24,0

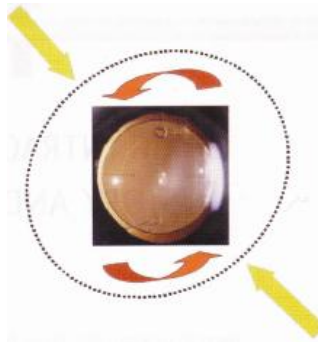
<b>1stQ/ Basis V</b>	Hydrophobes Akrylat	13,0	6,0		+1,0 bis +6,0
<b>Afidera/ ARTIS® T PL</b>	Hydrophobes Acrylat/ Vierpunkthaptikdesign	10,79 bzw. 10,5	6,0 bzw. 5,8	Rückfläche	+0,75 bis +6,0
<b>Argonoptics/ ALSAFIT TORIC VF</b>	Hydrophobes und Hydrophi- les Acrylat/ Plattenhaptiken	11,0	6,0		+1,0 bis +6,0
<b>Firma Rück/ Acriva<sup>UD</sup> BB T UDM 611</b>	Hydrophiles Acrylat mit hydrophober Oberfläche/ Plattenhaptiken	11,0	6,0		+1,0 bis +6,0
<b>IOL Expert/ Visiotis toric +</b>	Hydrophiles Acrylat mit hydrophober Oberfläche/ Doppel-C-Schlaufen	12,0	6,0		+1,5 bis +5,25
<b>W20/ MINI 4 Ready</b>	Hydrophiles Acrylat mit hydrophober Oberfläche/ 4- Schlaufenhaptik	10,75	6,0	Rückfläche	+1,5 bis +4,5

**Tabelle 1:** Übersicht der gängigen Modelle von torischen Intraokularlinsen

Neben den monofokalen torischen Intraokularlinsen stehen den Augenchirurgen zahlreiche Modelle von kombinierten multifokalen bzw. trifokalen torischen Intraokularlinsen zur Verfügung vor. In dieser Arbeit wird gezielt auf die Anwendung von monofokalen torischen Intraokularlinsen ausführlicher eingegangen.

Es folgt eine Übersicht der Faktoren, die für die postoperative Rotation einer torischen Intraokularlinse wichtig sind:

1. Die Konfiguration der Linse: Früher vertraten einige Autoren die Auffassung, dass die Intraokularlinsen mit rechteckigen Plattenhaptiken eine höhere Rotationsstabilität als Linsen mit Schlaufenhaptiken aufweisen. Das Verkleben der Kapsel, welches zwei Wochen nach der Implantation einer Plattenhaptiklinse abgeschlossen sei, sei symmetrisch, während es sich nach der Implantation einer Schlaufenhaptiklinse asymmetrisch und entgegen dem Uhrzeigersinn zeige [101][Patel et al, 1999], (Abbildung 31).



**Abbildung 31:** Schematisches Bild der kapsulären Kompression bei C-Schlaufenhaptiken, die eine Linsenrotation entgegen dem Uhrzeigersinn erzeugen kann

(J. Gills, *A complete Surgical Guided for Correcting Astigmatism, an Ophthalmic Manifesto*, 2003, S. 144 mit freundlicher Genehmigung von Dr. Gills und Prof. Dick)

Eine Z-Schlaufen-Konfiguration der Haptiken sei laut Warlo et al (2002) mit einer höheren Rotationsstabilität als bei den C-Schlaufenhaptiken verbunden, da die C-Schlaufenhaptiken einen kleineren Widerstand gegenüber Rotationskräften zeigten [102].

Neuere Studien stellten jedoch eine vergleichbare Stabilität einer torischen Intraokularlinse mit C-Schlaufenhaptiken und einer mit Plattenhaptiken [103][Scialdone et al, 2013], [104][Chang, 2008] sowie eine hohe Stabilität unterschiedlicher Intraokularlinsen mit C-Schlaufen-Design fest [105][Ferreira et al, 2012].

2. Die Größe des Kapselsacks im Verhältnis zum Linsendurchmesser: Die Stabilisierung einer IOL wird hauptsächlich durch die Fusion des Vorderkapsel- mit dem Hinterkapselblatt verursacht. Ein größerer Durchmesser des Kapselsacks geht mit einer höheren Instabilität einher. Patel et al [101] behaupten, dass ein größerer Kapselsack kleinere



äquatoriale Reibungskräfte aufweist und somit mit einer reduzierten IOL-Stabilität verbunden ist. Früher, als keine individuelle Anfertigung von torischen Intraokularlinsen für Patienten mit hohem Astigmatismus möglich war, wurden gelegentlich zwei Intraokularlinsen miteinander verbunden und sodann ins Auge implantiert, d. h. es wurde eine sog. „Piggyback“-Implantation durchgeführt. Dabei wurden die Plattenhaptik-Intraokularlinsen jeweils rückseitig aufgelegt, durch die vorhandenen Öffnungen an den Haptiken zusammengenäht und zusammen in den Kapselsack implantiert. Dies füllte den Kapselsack komplett aus und führte zu einer hohen Rotationsstabilität [106][Gills, 2003].

3. Die Achsenlänge des Auges: In den meisten Veröffentlichungen wird aufgezeigt, dass eine größere Achsenlänge mit einer höheren postoperativen Linsenrotation der torischen Intraokularlinse verbunden ist [107][Shah et al, 2012], [108][Zhu et al, 2015]. Patel et al [101] stellten einen leichten Zusammenhang zwischen Achsenlänge und ausgeprägter Rotation von mehr als 30° fest.

Andere Veröffentlichungen sehen keine Korrelation zwischen biometrischen Parametern (u. a. Achsenlänge) und einer postoperativen Linsenrotation [109][Klamann et al, 2013].

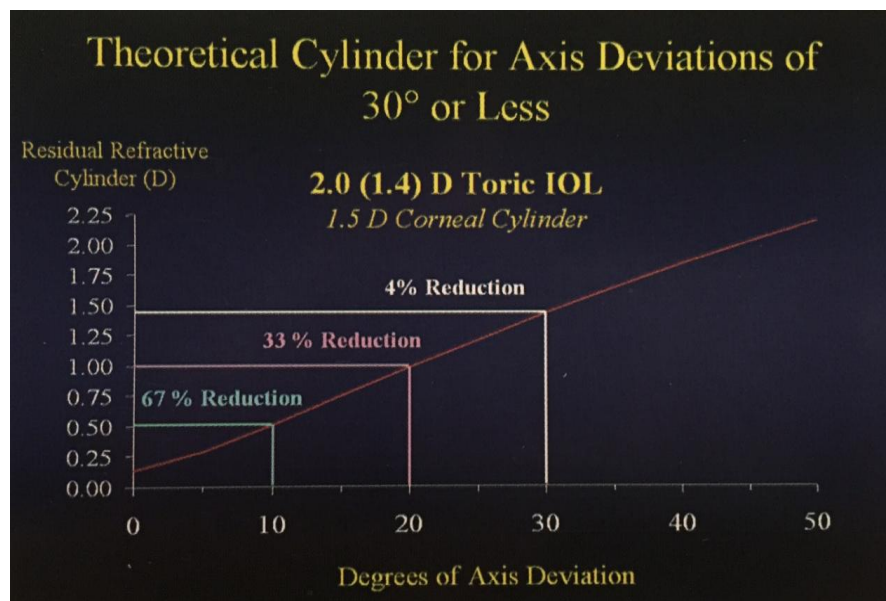
Manche Autoren hingegen stellten eine höhere Rotationstendenz bei hyperopen Augen fest [110][Till et al, 2002]. Tehrani et al [111] zeigten auf, dass es eine statistisch relevante Korrelation zwischen Achsenlänge, Kapselsackdurchmesser und Schrumpfung des Kapselsacks nach der Implantation einer hydrophoben dreiteiligen Acrylatlinse gibt. Von diesen Autoren wurde behauptet, dass bei längeren Augen eine höhere Tendenz zur Kapselschrumpfung vorliegt, während bei hyperopen Augen die Kapselschrumpfung geringer ausfällt und damit die Stabilität der Linse auch geringer ist.

Diese Diskrepanz lässt sich im Wesentlichen dadurch erklären, dass die o. g. Autoren unterschiedliche Modelle von Intraokularlinsen geprüft haben.

4. Die Größe der Kapsulorhexis: Die torische Intraokularlinse soll zusammen mit beiden Haptiken in den Kapselsack durch eine Kapsulorhexis, die idealerweise 0,5 mm kleiner als die Optik der Intraokularlinse ist, implantiert werden. Die Kontaktfläche zwischen Kapsel und Intraokularlinse kann theoretisch eine Adhäsion und eine darauffolgende Rotationsstabilität begünstigen. Aus diesem Grund ist eine große Kapsulorhexis als Risikofaktor für eine postoperative Linsenrotation anzusehen [112][*Torquetti, 2015*].
  
5. Große Öffnungen an der Peripherie der Plattenhaptiken einer torischen IOL begünstigen die Stabilität der Linse nicht [113][*Schwenn et al, 2000*].
  
6. Die Ausrichtung der Intraokularlinse in dem Kapselsack: *Shah et al* [107] stellten keinen Zusammenhang zwischen der Ausrichtung der Intraokularlinse in dem Kapselsack bei der Implantation (vertikal, horizontal, schräg) und der Rotationsstabilität der torischen Intraokularlinsen fest.
  
7. Kohäsives Viskoelastikum, z. B. Healon<sup>®</sup> (Pharmacia, Peapack, NJ), Provisc<sup>®</sup> (Alcon, Forth Worth, TX), Amvisc<sup>®</sup> (Bausch & Lomb, Rochester, NY), schmiert die IOL-Oberfläche weniger und begünstigt ihre Rotation in geringerem Maße als dispersive Viskoelastika, wie z. B. Viscoat<sup>®</sup> (Alcon), Amvisc plus<sup>®</sup> (Bausch & Lomb), dies tun [106][*Gills, 2003*].
  
8. Die sorgfältige Entfernung von Viskoelastikum hinter der IOL mittels Irrigation/ Aspiration maximiert den Kontakt zwischen der IOL und der hinteren Kapsel und damit die Stabilität der IOL [106][*Gills, 2003*].
  
9. Am Ende einer Kataraktoperation sollte das Auge nicht übermäßig tonisiert sein. Das Auge etwas weicher als üblich zu belassen, begünstigt, dass der schlaffe Kapselsack um die torische IOL „kollabiert“ [106][*Gills, 2003*].

Sämtliche o. g. Parameter spielen eine entscheidende Rolle hinsichtlich der Rotationsstabilität einer torischen Intraokularlinse. Die Diskrepanz in den unterschiedlichen Studien über die postoperative Rotation unterschiedlicher Modelle (z. B. Plattenhaptik vs. C-Schlaufenhaptik) ist damit zu erklären, dass alle restlichen Faktoren (z. B. die Größe der Kapsulorhexis oder die Entfernung von Viskoelastikum hinter der IOL am Ende der Operation) nicht gleichermaßen berücksichtigt wurden.

Die Rotation einer torischen Linse entsteht zumeist innerhalb der ersten 24 Stunden postoperativ und hauptsächlich entgegen dem Uhrzeigersinn [98][Shimizu et al, 1994], [101][Patel et al, 1999]. Eine Abweichung der Achse der torischen Korrektur von der geplanten Achse reduziert die erzielte astigmatische Korrektur, die erreicht wird. 10° Achsenabweichung entsprechen einem Effektverlust von etwa 33 %, 20° Abweichung entsprechen einem Effektverlust von etwa 66 % und wenn die Abweichung mehr als 30° beträgt, tritt eine Astigmatismuszunahme auf (Abbildung 32) [114][Gerten et al, 2001].



**Abbildung 32:** Die prozentuale Auswirkung der Achsenabweichung der TIOL auf die Korrektur des refraktiven Astigmatismus (J. Gills, *A complete Surgical Guided for Correcting Astigmatism, an Ophthalmic Manifesto*, 2003, S. 172 mit freundlicher Genehmigung von Dr. Gills)

Die Korrektur der Achse einer rotierten torischen Linse sollte zwischen der ersten und zweiten postoperativen Woche erfolgen. Zu diesem Zeitpunkt hat

sich die Kapsel in einem gewissen Grad kontrahiert, jedoch nicht soweit, dass eine Rotation der Intraokularlinse unmöglich wäre. Torische Intraokularlinsen, die zu früh revidiert wurden, zeigten eine Instabilität der Achse und eine Tendenz zur erneuten Rotation nach der Korrektur [115][Gills, 2003]. Eine Revision der Linsenachse nach der zweiten Woche wird aufgrund der Fibrosierung erschwert und daher nicht empfohlen.

### 1.9 Der Effekt des Kataraktzugangs

Die Stabilität und Vorhersagbarkeit der o. g. astigmatismuskorrigierenden Methoden steht in direkter Verbindung mit dem Effekt der Kataraktinzision. Eine stabile, astigmatism-neutrale Kataraktinzision erlaubt eine astigmatistische Korrektur, die ausschließlich von dem präoperativen kornealen Astigmatismus abhängig ist. Zahlreiche Studien haben die Sicherheit der „*Clear-Cornea*“ Inzisionen, die kleiner als 3 mm sind, bezüglich der Astigmatismusinduktion bewiesen. *Masket* hat mittels Vektor-Analyse gezeigt, dass eine 3,0 x 2,5 mm große temporale „*Clear-Cornea*“ Inzision einen Gesamtastigmatismus von 0,5 Dpt mit weniger als 0,25 Dpt Zylinderänderung auf dem Meridian der Inzision verursacht. Es wurde auch die refraktive Stabilität dieses Schnittes postoperativ gezeigt [67][*Masket et al*, 1996]. Auch weitere Studien berichten über ähnliche Befunde [68][*Kohnen et al*, 1995], [69][*Pfleger et al*, 1996].

Der Vergleich zwischen temporaler und superiorer Platzierung der „*Clear-Cornea*“ Inzision zeigte, dass die Abflachung an dem Meridian des Schnittes größer bei den superioren Inzisionen ist [116][*Long et al*, 1997]. Dies unterstützt die These, dass, wenn eine astigmatism-neutrale Inzision gewünscht ist, eine temporale Lage des Hauptschnitts zu bevorzugen ist.

Voraussetzung für eine erfolgreiche Planung der Astigmatismusreduktion ist eine astigmatism-neutrale, temporale, nahtlose „*Clear-Cornea*“ Inzision, die kleiner als 3,2 mm ist. Die astigmatistische Neutralität solcher Inzisionen wurde durch unterschiedliche Publikationen bestätigt [117][*Borasio et al*, 2006]. Kleinere Inzisionen von 2,2 mm bzw. 1,8 mm zeigen

eine noch geringere astigmatische Wirkung im Vergleich zu den traditionellen Inzisionen von 3,0 mm [118][*Masket et al, 2009*], [119][*Klamann et al, 2013*].

Im Rahmen der Kataraktoperationen werden in unserer Klinik standardisiert solche kleineren, temporalen, nahtlosen „*Clear-Cornea*“ Inzisionen durchgeführt, sodass keine Einwirkung des Hauptschnittes der Operation auf das refraktive Ergebnis des Eingriffes mitberücksichtigt werden muss.

## 2. Material und Methoden

Wir untersuchten retrospektiv die refraktiven sowie die topographischen Ergebnisse postoperativ nach astigmatismuskorrigierenden Verfahren im Rahmen moderner Kataraktchirurgie. Es wurde an insgesamt 176 Augen (87 rechte und 89 linke Augen) im Zeitraum von 01/2004 bis 03/2011 eine Kataraktoperation (Clear-Cornea-Schnitt, Phakoemulsifikation) und die Implantation einer monofokalen Hinterkammerlinse kombiniert mit peripheren Clear-Cornea-Relaxationsinzisionen (PCCRI) oder die Implantation einer torischen intraokularen Hinterkammerlinse (TIOL) durchgeführt. Das mittlere Alter der Patienten lag bei 68,76 Jahren (Minimum 19,29 Jahre, Maximum 87,79 Jahre). Ausschlusskriterien waren sämtliche Hornhautpathologien (z. B. irregulärer Astigmatismus, Keratokonus, Hornhautdystrophien, Narben usw.). Die maximale Beobachtungsdauer betrug acht Monate postoperativ.

Die erfassten Daten, die in die statistische Analyse einfließen, waren das Alter der Patienten am Tag der Operation, die Achsenlänge der operierten Augen, der vorliegende Astigmatismus, die Breite der astigmatismusreduzierenden Inzisionen, die Tiefe der astigmatismusreduzierenden Inzisionen, der bestkorrigierte Visus präoperativ und postoperativ sowie Daten der refraktiven und topographischen Astigmatismusanalyse (SIA, TIA, IOS, DV), wie es in Kapitel „Astigmatismusanalyse“ ausführlich beschrieben wird.

Hierzu teilten wir das Patientengut, zunächst anhand des durchgeführten astigmatismuskorrigierenden Verfahrens, in zwei Untergruppen ein.

## 2.1 Patientengruppen

### Patientengruppe I (PCCRI)

Die erste Gruppe bestand aus 110 Patienten, bei denen neben einer Phakoemulsifikation und Implantation einer monofokalen Hinterkammerlinse auch periphere Clear-Cornea-Relaxationsinzisionen (PCCRI) durchgeführt wurden.

### Patientengruppe II (TIOL)

Die zweite Gruppe umfasste 66 Patienten nach Implantation einer torischen intraokularen Linse (TIOL).

Folgende Modelle der TIOL wurden implantiert: Torica<sup>®</sup>-s (ehemals Dr. Schmidt MS6116), Acrysof<sup>®</sup> IQ und Rayner T-flex<sup>®</sup>.

## 2.2 Erfasste Messdaten

### Refraktion und Visus

Die subjektive Refraktionsbestimmung stellt die Grundlage zur Bestimmung der Sehschärfe und der Refraktion dar. Sie erfolgte in 5 m Abstand (Fernvisus) mit sphärozyklindrischen Korrekturgläsern. Die mittlere Sehschärfe wurde nach Snellen ermittelt und vor der Auswertung logarithmisch auf LogMAR-Visus umgerechnet. Die bestkorrigierten Visusangaben verstehen sich als Brillenvisus.

### Tonometrie

Die Messung des Intraokularsdrucks wurde nach Goldmann unter Applikation von Thilorbin<sup>®</sup> (1 ml enth. Oxybuprocain-HCl 4 mg, Fluorescein-Natrium 0,8 mg) Augentropfen ermittelt. Bei Konservierungsmittelallergie wurden Fluoreszein SE<sup>®</sup> (Fluorescein-Natrium) und Conjuncaïn<sup>®</sup> EDO<sup>®</sup> Augentropfen (1 ml enth. Oxybuprocain-HCl 4 mg) verwendet.

### Refraktiver Astigmatismus

Als refraktiver Astigmatismus wird der vom Patienten in der Brille akzeptierte subjektive Zylinder definiert.

### **Hornhauttopographie**

Die automatische anteriore Hornhauttopographieanalyse wurde mithilfe des placidobasierten Keratographen LC Typ 70610 der Firma Oculus durchgeführt. Der topografische Astigmatismus wurde dabei als die Differenz der Brechkräfte im steilen und flachen Meridian auf der tangentialen Aufnahme der Hornhautoberfläche definiert.

### **Hornhautpachymetrie**

Die automatische Hornhautpachymetrieanalyse wurde mittels Pentacam der Firma Oculus (Scheimpflugverfahren) durchgeführt. Die Hornhautdicke wurde auf das aufgenommene Bild manuell in der optischen Zone von 8 mm auf dem steilen Meridian gemessen. Die gewonnenen Werte wurden anschließend für die Planung der PCCRI gemäß Nomogramm berücksichtigt.

### **Klinische Untersuchung**

Es erfolgte eine klinische Biomikroskopie der vorderen Augenabschnitte mittels Haag-Streit BQ 900 Spaltlampe und anschließend die indirekte Ophthalmoskopie des Augenhintergrundes.

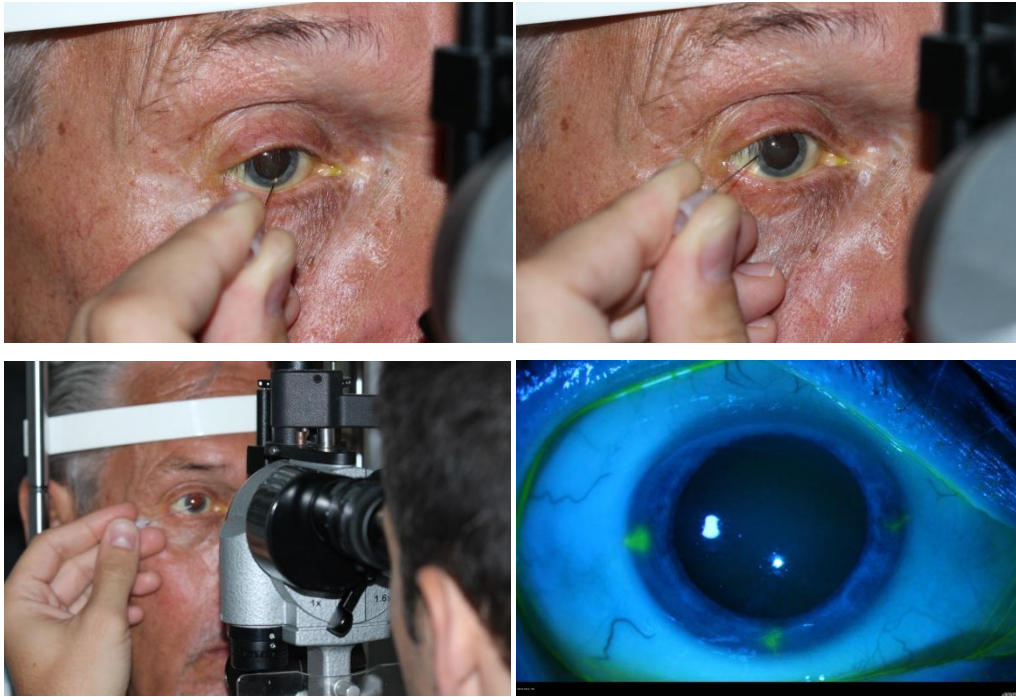
### **Biometrie**

Für die benötigten biometrischen Messungen (Keratometrie, Achsenlänge, Vorderkammertiefe) wurde das Gerät IOL Master XP Version 5.4.4.0006 (Carl Zeiss, Jena, Deutschland) verwendet und die Stärke der implantierenden IOL wurde anhand der SRK-T- und Haigis-Formeln berechnet.

### **Präoperative Hornhautmarkierung zur Festlegung der erforderlichen Astigmatismusachse**

Es erfolgte unmittelbar präoperativ eine Markierung der 0-180° bzw. 90-270° Achse mittels einer 27-Gauge-Nadel am Hornhautlimbus bei dem vor der Spaltlampe sitzenden Patienten (Abbildung 33).





**Abbildung 33:** Die präoperative Markierung der Hornhaut an der Spaltlampe (St. Vincentius Augenklinik der Vincentius-Diakonissen-Kliniken gAG, Karlsruhe, Deutschland)

### **Definition der Achse und des Betrags des zu korrigierenden Astigmatismus**

Der Festlegung der Achse und des Betrags des zu korrigierenden Astigmatismus wurden die Ergebnisse der Hornhauttopographie zugrunde gelegt.

Für die Patientengruppe I wurde bei der Planung der Durchführung der PCCRI ein Nomogramm angewandt (Abbildung 34), welches auf dem Nichamin-Nomogramm (Version 2006) [82] basiert, jedoch nach empirischen Werten unserer Klinik modifiziert worden ist. Dabei ist die Tiefe der Inzisionen nicht wie beim Nichamin-Nomogramm mit einer festen Tiefe von 600  $\mu\text{m}$  geplant, sondern individuell mit 95 % der Hornhautdicke. Dies führte dazu, dass die geplante Tiefe der Inzisionen bei manchen Patienten kleiner und bei anderen größer als die Tiefe gemäß Nichamin-Nomogramm (600  $\mu\text{m}$ ) war. Infolgedessen wurde die Breite der Inzisionen ca. 5° entsprechend kleiner oder größer als beim Nichamin-Nomogramm angepasst.

<b>Astigmatismus „gegen die Regel“: steile Achse 0°-30° / 150°-180°</b>							
<b>Präoperativer Astigmatismus</b>	<b>30-40 J.</b>	<b>41-50 J.</b>	<b>51-60 J.</b>	<b>61-70 J.</b>	<b>71-80 J.</b>	<b>81-90 J.</b>	<b>&gt; 90 J.</b>
<b>+0,75 bis +1,25</b>	55	50	45	40	35	35 (1 Inzision, nur nasal)	
<b>+1,5 bis +2,00</b>	70	65	60	55	45	40	35
<b>+2,25 bis +2,75</b>	90	80	70	60	50	45	40
<b>+3,00 bis +3,75</b>	90 auf 8 mm	90 auf 8 mm	85	70	60	50	45
<b>Astigmatismus „mit der Regel“: steile Achse 45°-145°</b>							
<b>Präoperativer Astigmatismus</b>	<b>30-40 J.</b>	<b>41-50 J.</b>	<b>51-60 J.</b>	<b>61-70 J.</b>	<b>71-80 J.</b>	<b>81-90 J.</b>	<b>&gt; 90 J.</b>
<b>+1,00 bis +1,50</b>	50	45	40	35	30		
<b>+1,75 bis +2,25</b>	60	55	50	45	40	35	30
<b>+2,50 bis +3,00</b>	70	65	60	55	50	45	40
<b>+3,25 bis +3,75</b>	80	75	70	65	60	55	45

**Abbildung 34:** Nomogramm zur Planung der PCCRI  
(St. Vincentius Augenklinik der Vincentius-Diakonissen-Kliniken gAG, Karlsruhe, Deutschland)

Für die Patientengruppe II wurde die Zielachse der torischen IOL durch das online zur Verfügung gestellte Programm des Herstellers berechnet. Hierfür wurden die mittlere Hornhautbrechkraft (K-Wert) auf der steilen und der flachen Achse der Hornhaut, die Lage der Inzision sowie der zu erwartende chirurgisch induzierte Astigmatismus mitberücksichtigt (Abbildung 35).

**Abbildung 35:** Online-Rechner der Firma Alcon für die präoperative Berechnung der torischen Intraokularlinse  
(© Alcon)

### 2.3 Perioperative Instrumenten- und Medikamentenanwendung

Für die Vorbereitung zur Operation wurden folgende Medikamente verwendet:

a) Oberflächenbetäubung:

- Ophthocain<sup>®</sup>-N Augentropfen (Tetracain-HCl, 6 mg pro 1 g), zweifache Applikation innerhalb von fünf Minuten
- Xylocain<sup>®</sup>-Gel 2 % (Lidocain-HCl)

b) Präoperative Bindehautdesinfektion:

Braunol-Augentropfen 5 % (Povidon-Iod), zweifache Applikation innerhalb von drei Minuten

c) Präoperative Hautdesinfektion:

Braunol-Hautdesinfektion (Povidon-Iod 7,5 g auf 100 g mit 10 % verfügbarem Iod)

Im Falle einer Allergie gegen Jod wurde Octenisept® Lösung (Octenidin-2HCl 0,1 g, Phenoxyethanol 2 g) verwendet.

d) Peribulbäranästhesie:

Lokalanästhetikum: Xylonest® 2 % (Prilocain-HCl), Scandicain® 1 % (Mepivacain-HCl), Carbostesin® 0,5 % (Bupivacain-HCl)

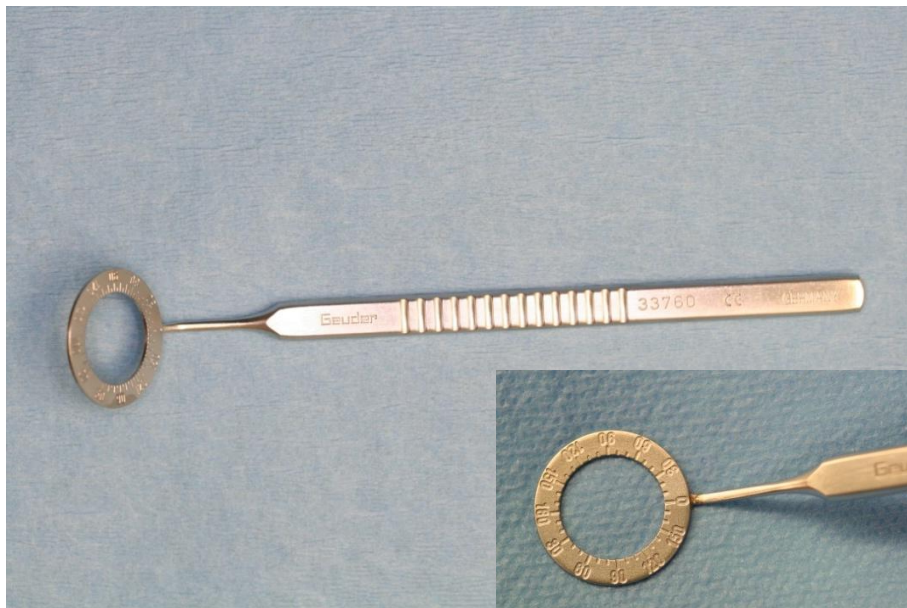
Intraoperativ fand folgendes Instrumentenset Anwendung:

1 Kolibripinzette (G-18965, Geuder), 1 Kapsulorhexispinzette (G-31305, Geuder), 1 chirurgische Pinzette (G-18791, Geuder), 1 Knüpfpinzette (G-19030, Geuder), 1 Schere nach Stevens, gebogen (G-19485, Geuder), 1 Spülkanülenhandgriff nach Brauweiler Irrigation (G-32771, Geuder), 1 Spülkanüle nach Brauweiler Irrigation (G-32776, Geuder), 1 Saugkanülenhandgriff nach Brauweiler Aspiration (G-32773, Geuder), 1 Saugkanüle nach Koch Aspiration (G-32769, Geuder), 1 Diamantmesser 2,8-3,0 mm (ST-2818, Acritec), 1 Ultraschallhandgriff (G-24025, Geuder), 1 Mega-Ultraschallspitze Titan 30° (G-24055, Geuder), 1 Infusionsaufsatz, Silikon für Ultraschallhandgriff (G-24101, Geuder), 1 Schraubendrehschlüssel für Ultraschallspitze 30° (G-24110, Geuder), 1 Testvorderkammer (Silikon) (G-24120, Geuder), 1 Irisspaltel (G-32728, Geuder), 1 Hämmerchen (Irishäkchen) (G-31911, Geuder), 1 Positionshäkchen nach Rentsch doppelt (G-32555, Geuder), 1 Gäbelchen (Linsenkernrotierer) (G-32160, Geuder), 1 Chopper nach Neuhann (G-32505, Geuder), 1 Kapselpolierkürette gerade 135° (G-32563, Geuder), 1 Kapselpolierkürette 90° (G-32564, Geuder), 1 Brausekanüle (G-15200, Geuder), 1 Fixiering (G-31491, Geuder), 2 Mikroskopkappen (G-31491, Geuder Fa. Haag & Streit), 1 Lidsperrerr nach Bangerter (G-16010, Geuder), 1 Bedienungsstift (Nagel) (G-28125, Geuder), Implantationsbesteck (2 Shooter, 1 Fasspinzette, 1 Faltpinzette).

Für die Durchführung der PCCRI wurden zusätzlich folgende Instrumente benötigt:

1 Messring nach Mendez (G-33760, Geuder) (Abbildung 36), 1 Diamantmesser für Keratotomie Titan/ 1 Schnittkante 45° 0,5 mm (G-19345, Geuder) (Abbildung 37), Hornhautmarkierer 4 Klingen Innendurchmesser/ 3,0 mm / Außendurchmesser 12 mm (G-33725, Geuder) (Abbildung 38), Fluoreszein SE® (Fluorescein-Natrium).

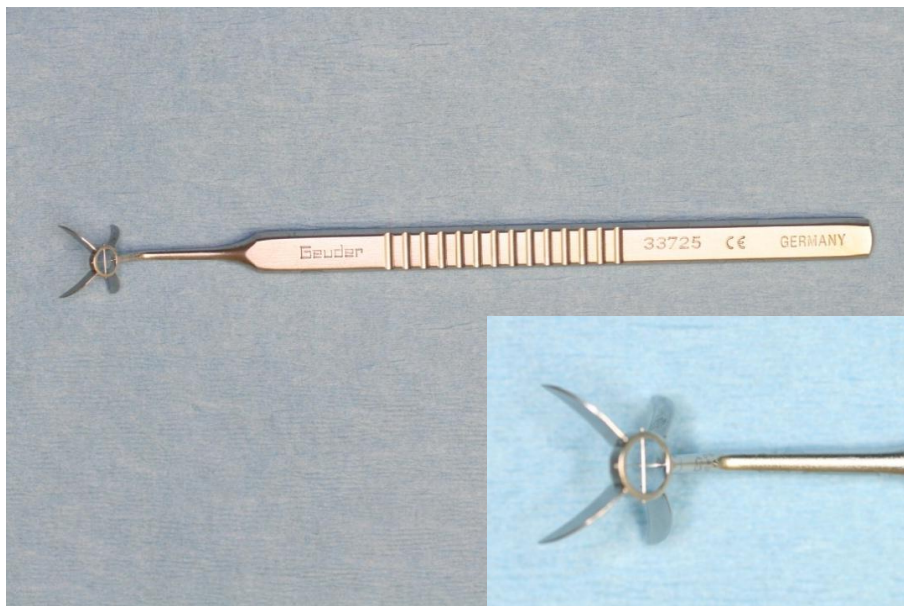
Am Ende der Operation wurde in der Regel subkonjunktival Xylonest® 2 % (Prilocain-HCl) 1 ml plus Dexaflam® injekt 4 mg (Dexamethason-dihydrogenphosphat-Dinatrium) und Ciprobay® (Ciprofloxacin) eingegeben.



**Abbildung 36:** Messring nach Mendez (G-33760, Geuder)  
(St. Vincentius Augenklinik der Vincentius-Diakonissen-Kliniken gAG, Karlsruhe, Deutschland)



**Abbildung 37:** Diamantmesser für Keratotomie Titan/ 1 Schnittkante 45° 0,5 mm (G-19345, Geuder)  
(St. Vincentius Augenklinik der Vincentius-Diakonissen-Kliniken gAG, Karlsruhe, Deutschland)



**Abbildung 38:** Hornhautmarkierer 4 Klingen Innendurchmesser/ 3,0 mm/ Außendurchmesser 12 mm (G-33725, Geuder)  
(St. Vincentius Augenklinik der Vincentius-Diakonissen-Kliniken gAG, Karlsruhe, Deutschland)

## **2.4 Postoperative Nachbetreuung und medikamentöse Begleittherapie**

Postoperativ wurden lokal Isopto-Max<sup>®</sup> Augentropfen (1 ml enth. Dexamethason 1 mg, Neomycinsulfat 3500 IE, Polymyxin-B-sulfat 6000 IE) 5-mal täglich bzw. Inflanefran<sup>®</sup> Forte Augentropfen (1 ml enth. Prednisolonacetat 10 mg) und 1-mal täglich Isopto-Max<sup>®</sup> Augensalbe zur Nacht appliziert. Pflegende Gele sowie Tränenersatzmittel sorgten bei Bedarf für eine ausreichende Befeuchtung der Augenoberfläche. Bei Bedarf wurde dieses Standardtherapieschema den Bedürfnissen des jeweiligen Patienten entsprechend modifiziert.

## **2.5 Zielgrößen**

Die Entwicklung folgender Zielgrößen sollten in ihrem Verlauf beobachtet werden:

1. die postoperative Visusentwicklung
2. der refraktive Astigmatismus
3. der topographische Astigmatismus
4. die postoperative Achse der torischen Intraokularlinsen

Die Beurteilung der postoperativen Achse der implantierten torischen Intraokularlinse erfolgt mittels regredienten Lichts an der Spaltlampe. Nach medikamentöser Mydriasis wird der Lichtspalt der Spaltlampe eng gestellt und regredient auf die Intraokularlinse gerichtet. Anschließend wird der Lichtspalt entsprechend gedreht, sodass er auf beide Achsenmarkierungen der torischen Intraokularlinse gelegt wird. Auf der Skala der Spaltlampe kann somit der Sitz des Torus der implantierten Intraokularlinsen abgelesen werden.

## **2.6 Statistische Methoden**

Die statistische Auswertung der o. g. Zielgrößen erfolgte durch die Anwendung des Programms MatLab Version R2012a, The Mathworks Inc.

## 2.7 Astigmatismusanalyse

Wie bereits im allgemeinen Teil erwähnt, wird ein Astigmatismus durch seine Größe und seine Achse definiert. Diese Eigenschaft generiert deshalb eine besondere Problematik bei der Auswertung von refraktiv-chirurgisch induzierten Astigmatismusveränderungen.

Die sphärischen und zylindrischen Werte ermöglichen es, den refraktiven Status sowohl eines einzelnen Patienten als auch einer Patientengruppe zu definieren, sind jedoch zur unmittelbaren mathematischen oder statistischen Auswertung nicht geeignet. Zwischen 1968 und 1996 wurde eine Vielzahl unterschiedlicher, einfacher Methoden zur Astigmatismusanalyse erarbeitet und veröffentlicht [120][Naeser, 2008]. Jedoch waren diese Methoden oft nicht frei von systematischen Fehlern und lieferten keine reproduzierbaren Ergebnisse.

Auch aktuell, trotz mehrfacher Versuche der weltweiten ophthalmologischen Gesellschaft, eine Standardisierung in der Astigmatismusanalyse festzulegen, ist noch kein Konsens erreicht. Zahlreiche Publikationen heutzutage wenden oft unterschiedliche Methoden zur Analyse des Astigmatismus an.

Für die individuelle Astigmatismusanalyse liegen folgende Möglichkeiten vor:

- Die einfache Subtraktionsanalyse: Die Astigmatismusanalyse mithilfe dieser elementaren Methode vergleicht die präoperative und postoperative Größe des Astigmatismus ohne Bezug auf die Achse. Hier wird eine einfache Subtraktion der Größe des Astigmatismus durchgeführt, wobei positive Werte auf eine Zunahme, negative Werte auf eine Abnahme des Astigmatismus hinweisen.
- Die Polaranalyse: Hier wird der Abflachungs- bzw. Versteilungseffekt des operativ induzierten Astigmatismus auf der 90° Referenzachse ausgewertet. Positive Werte zeigen eine „mit der Regel“-Änderung, wohingegen negative Werte eine „gegen die Regel“-Änderung zeigen.
- Die Vektorenanalyse: Diese Methode, welche eine vollständige Auswertung der astigmatischen Veränderungen sowohl an Größe als auch an Achse erlaubt, wird im Folgenden ausführlich erläutert.



Bei dieser Arbeit wurden mehrere Publikationen mit dem Thema der „Astigmatismusanalyse“ zusammengefasst und die Schlussfolgerungen im Wesentlichen dreier Spezialisten zu diesem Thema übernommen.

*Noel A. Alpins (FRACO, FRCOphth, FACS, Cheltenham, Victoria, Australien), Kristian Naeser (Eye Clinic, Regional Hospital Randers and Department of Ophthalmology, Aarhus University Hospital and Department of Ophthalmology, Aalborg Hospital, Aarhus University Hospital, Dänemark) sowie Jack T. Holladay (MD, University of Texas Medical School, Department of Ophthalmology, Baylor College of Medicine, Houston, Texas, USA) formulierten zahlreiche übereinstimmende Thesen für die Analyse des Astigmatismus.*

Die Analyse von irregulärem Astigmatismus mit seinen Aberrationen höherer Ordnung erfordert höhere Mathematik. Die Vektorenanalyse kann auch bei irregulärem Astigmatismus angewandt werden. Dafür ist es notwendig, die zwei Hälften der Hornhaut getrennt zu analysieren und beide Hälften auf einem 360°-Polardiagramm darzustellen. Im Folgenden ist, wenn von Astigmatismus gesprochen wird, der reguläre Astigmatismus gemeint.

Erst nach Umwandlung des Astigmatismus in einem kartesischen Koordinatensystem mit Polarwerten ist die Anwendung von allen bekannten mathematischen sowie statistischen Formeln erlaubt und anschließend eine korrekte Berechnung von statistischen Größen, wie z. B. Mittelwert, Standardabweichung, Korrelationskoeffizienten usw. sowohl für einzelne Patienten als auch für Patientengruppen möglich.

Obwohl Astigmatismus und sonstige mathematische Vektoren in den gleichen Einheiten (Größe und Achse) definiert werden, ist es äußerst wichtig zu betonen, dass sie sich in ihren Grundeigenschaften deutlich unterscheiden. Der Astigmatismus ist ein statischer Begriff und auf einer torischen Oberfläche messbar, während ein mathematischer Vektor einen dynamischen Begriff darstellt und seine beiden Komponenten (Größe und Achse) nicht messbar, sondern kalkulierbar sind. Arithmetische Berechnungen zwischen Astigmatismus und sonstigen mathematischen Vektoren sind somit nicht zulässig [121][*Alpins et al, 2004*].

Vektoren dürfen jedoch für die Präsentation von Astigmatismus angewandt werden. Auf diese Weise ist es möglich, die Veränderungen an jeder Komponente (Größe und Achse) zu untersuchen.

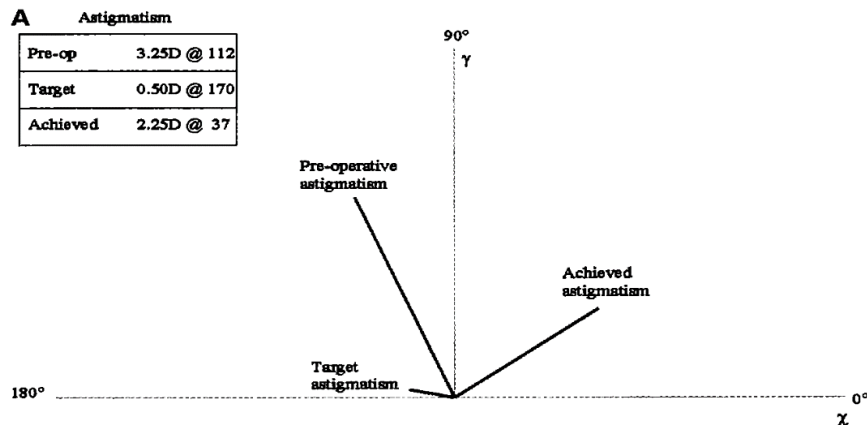
Ein Astigmatismus einer Achse  $x$  hat die gleiche klinische Bedeutung wie nach einer Achsendrehung von  $180^\circ$  (z. B. ein Astigmatismus von 2 Dpt bei  $0^\circ$  hat den gleichen Effekt wie ein Astigmatismus von 2 Dpt bei  $180^\circ$ ). Demgegenüber erfordern Geometrie und Trigonometrie die Drehung eines Vektors um  $360^\circ$ , um an den gleichen Punkt zurückkehren zu können. Damit ist ein Vektor von 2 Einheiten bei  $0^\circ$  nicht gleich einem Vektor von 2 Einheiten bei  $180^\circ$ , sondern gleich einem Vektor von 2 Einheiten bei  $360^\circ$ . Es muss deswegen im Rahmen der Astigmatismusauswertung der Winkel des Astigmatismus verdoppelt werden, um die konventionellen geometrischen, trigonometrischen und vektorischen Formeln applizieren zu können, sodass  $0^\circ$  und  $180^\circ$  (verdoppelt  $0^\circ$  und  $360^\circ$ ) mathematisch äquivalent werden. Nach dieser Umwandlung sind alle bekannten geometrischen und trigonometrischen Formeln anwendbar [122][Holladay et al, 1998]. Diese These unterstützen auch *Alpins* [123] und *Naeser* [124]. Nachdem die mathematische Auswertung des Astigmatismus als Vektor erfolgt ist, bekommen die Achsenänderungen des Astigmatismus erst dann eine klinische Bedeutung, wenn die Achse durch zwei dividiert und anschließend auf einem Diagramm präsentiert wird [123][Alpins, 2001].

Die Anwendung von Doppelwinkel-Diagrammen, bei denen der Winkel der Vektoren zur Auswertung verdoppelt wird, sodass Winkel von  $0^\circ$  äquivalent zu denen von  $180^\circ$  werden, bietet die beste Methode, um Astigmatismusänderungen interpretieren zu können [125][Holladay et al, 1998], [120][Naeser, 2008], [126][Alpins, 2001]. In der refraktiven Chirurgie sind die Doppelwinkel-Diagramme als Präsentationssysteme am häufigsten verbreitet [124][Naeser, 2008].

Wichtige Begriffe für die Astigmatismusanalyse sind der „Gezielt Induzierte Astigmatismus“ („*Target Induced Astigmatism*“, abgekürzt TIA), der „Chirurgisch Induzierte Astigmatismus“ („*Surgically Induced Astigmatism*“, abgekürzt SIA) und der „Differenzvektor“ („*Difference Vector*“, abgekürzt DV).

*Alpins et al* [127] versuchten, diese Begriffe mithilfe des Golfspiels als Beispiel verständlich zu beschreiben. Das Golfschlagen zeigt ähnliche Konzepte wie die Analyse der Astigmatismuskorrektur. Der Golfspieler versucht, durch seinen Golfschlag den Ball von Punkt A zu Punkt B zu bringen, ähnlich wie der Operateur durch seine operative Einwirkung den präoperativen Astigmatismus von Betrag A zu Betrag B verändern will. Ein Golfschlag von Punkt A zu Punkt B ähnelt somit einem operativ erzeugten Vektor, der mit seiner Länge (Größe) und Richtung (Achse) eine korneale Veränderung verursacht. Ausführlicher: Wenn ein Golfschlag misslungen ist, ist Folgendes passiert: Entweder ist die Kraft, mit der der Ball geschlagen wurde, zu stark oder zu schwach gewesen, oder die Richtung wich im Uhrzeigersinn (*clockwise*, CW) oder gegen den Uhrzeigersinn (*counterclockwise*, CCW) ab. Am häufigsten passiert beides. Der verständlichste Parameter des allgemeinen Erfolgs eines Golfschlages ist die Strecke eines zweiten Schlages, der das Einlochen ermöglichen könnte (Abbildung 39a, b, c).

## ALPINS AND GOGGIN

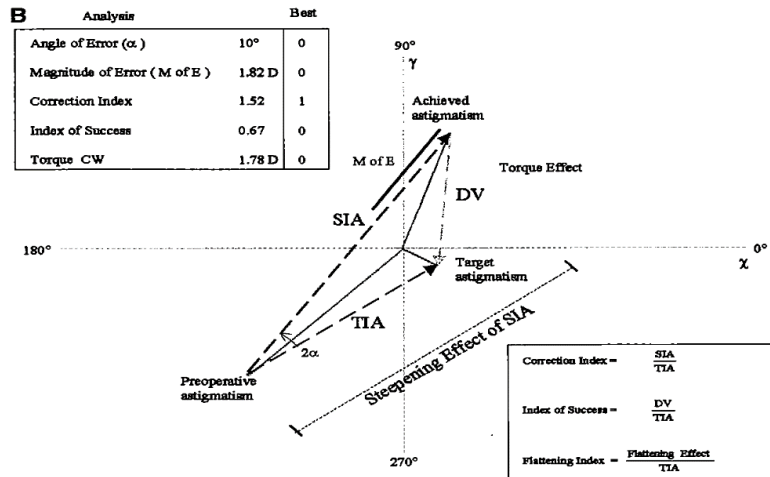


**Abbildung 39a, b, c:** Astigmatismusanalyse nach *Alpins*

**Abbildung 39a:** *Alpins N., Goggin M., Practical Astigmatism Analysis for Refractive Outcomes in Cataract and Refractive Surgery, Survey of Ophthalmology, Jan-Feb 2004, Band 49, Heft 1, S. 115, mit freundlicher Genehmigung von Dr. Alpins)*

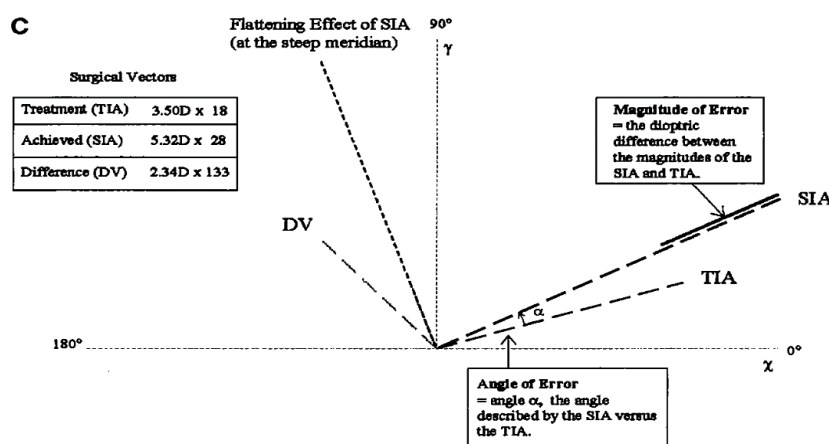
Die Prinzipien der Astigmatismusanalyse nach *Alpins* bezüglich der Planung und Analyse der Astigmatismuschirurgie sind genauso einfach wie das o. g. Beispiel. Der angepeilte Effekt der Astigmatismuschirurgie (in dem Golfbeispiel die Strecke des Balls zum Loch) ist der TIA. Der tatsächliche Effekt (in dem Golfbeispiel die Strecke, die der Ball nach dem Schlag zurückgelegt hat)

entspricht dem SIA. Letztlich beschreibt der DV die Größe und die Richtung des therapeutischen Effektes, welcher noch notwendig ist, um das ursprüngliche Ziel zu erreichen. In dem Golfbeispiel entspricht dies dem zweiten Schlag, der zum Einlochen notwendig ist.



**Abbildung 39b:** Astigmatismusanalyse nach *Alpins*  
 (*Alpins N., Goggin M., Practical Astigmatism Analysis for Refractive Outcomes in Cataract and Refractive Surgery, Survey of Ophthalmology, Jan-Feb 2004, Band 49, Heft 1, S. 115, mit freundlicher Genehmigung von Dr. Alpins*)

Die Vektoren TIA, SIA, DV werden in einem kartesischen Koordinatensystem dargestellt, sodass eine mathematische Auswertung möglich wird.



**Abbildung 39c:** Astigmatismusanalyse nach *Alpins*  
 (*Alpins N., Goggin M., Practical Astigmatism Analysis for Refractive Outcomes in Cataract and Refractive Surgery, Survey of Ophthalmology, Jan-Feb 2004, Band 49, Heft 1, S. 115, mit freundlicher Genehmigung von Dr. Alpins*)

Folgende Begriffe werden von *Alpins et al* für die Astigmatismusanalyse beschrieben [128], (Abb. 17) wobei die englischsprachigen Abkürzungen verwendet werden, um Missverständnisse mit der internationalen Bibliographie zu vermeiden:

- TIA (*Target Induced Astigmatism vector*): Der gezielt induzierte Astigmatismus  
beschreibt die astigmatische Veränderung (mit Größe und Achse), welche durch die Operation erzielt wird.
- SIA (*Surgically Induced Astigmatism vector*): Der chirurgisch induzierte Astigmatismus  
beschreibt die Größe und Achse der astigmatischen Korrektur, die durch die Operation induziert wurde.
- CI (*Correction Index*): Der Korrekturindex  
wird kalkuliert aus der Ratio des SIA zum TIA (d. h. das, was die Operation wirklich induziert hat vs. dem, was angestrebt wurde) und wird berechnet durch das Dividieren des SIA (wirklicher Effekt) durch den TIA (Zieleffekt).  
Der CI sollte idealerweise 1,0 betragen.  
Werte über 1,0 deuten auf eine Überkorrektur, Werte unter 1,0 auf eine Unterkorrektur hin.  
Der CI zeigt dem Operateur, wie effektiv die Astigmatismusbehandlung war.
- DV (*Difference Vector*): Der Differenzvektor  
beschreibt die notwendige Veränderung des Astigmatismus (in Größe und Achse), die es dem Operateur ermöglicht, sein ursprüngliches Ziel nach einem zweiten Versuch zu erreichen.  
Der DV ist ein absolutes Erfolgsmaß und liegt idealerweise bei 0.  
Der DV ist spezifisch für das Auge, über welches er kalkuliert wurde.  
Die Größe des Vektors spiegelt den Erfolg des Eingriffs wider und er-

möglicht einen statistischen Vergleich zwischen mehreren Operationen [129][Alpins, 1993].

Die Größe des DV zeigt die dioptrische Abweichung zwischen Ziel und Ergebnis. Sie ist somit unabhängig von dem TIA-Vektor und stellt daher den Erfolg der Operation unabhängig von der initial erwünschten Größe der Korrektur dar [129][Alpins, 1993].

- IOS (*Index of Success*): Der Erfolgsindex

wird kalkuliert durch das Dividieren des DV durch den TIA (die gezielte Behandlung).

Der IOS ist ein relatives Erfolgsmaß und ist idealerweise 0.

Werte zwischen 0 und 1 zeigen einen partiellen Erfolg, z. B. zeigt ein Wert von 0,2 einen Erfolg von 80 % [129][Alpins, 1993].

Werte gleich 1 zeigen keine Verbesserung des präoperativen Status, während Werte größer als 1 eine Verschlechterung des astigmatischen Status darstellen [126][Alpins, 2001].

Der IOS ermöglicht den Vergleich der Ergebnisse zwischen mehreren Gruppen oder Techniken.

Wenn der DV null ist, ist der IOS auch null, was darauf hinweist, dass das astigmatische Ziel erreicht wurde [129][Alpins, 1993].

- FE (*Flattening Effect*): Der Abflachungseffekt

beschreibt die Menge der Astigmatismusreduktion, die durch den effektiven Teil des SIA auf dem gezielten Meridian erreicht wurde ( $FE = SIA * \cos^2 * AE$ ).

Der FE quantifiziert den positiven Effekt auf den präoperativen Astigmatismusmeridian.

- FI (*Flattening Index*): Der Abflachungsindex

wird kalkuliert durch das Dividieren des FE durch den TIA und beträgt idealerweise 1.

Der FI zeigt, wie effektiv die Behandlung in der Astigmatismusreduktion war.

- Torque

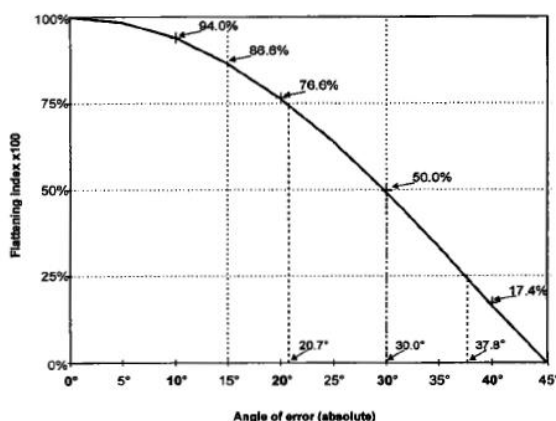
beschreibt den Betrag der durch den SIA induzierten astigmatischen Änderung, die ineffektiv für die Astigmatismusreduktion auf dem gezielten Meridian war. Der Torque verursacht eine Rotation und eine leichte Zunahme des bestehenden Astigmatismus [129][Alpins, 1993]. Wenn ein Vektor (SIA) in einem Winkel von  $45^\circ$  zu dem steilen Meridian der Hornhaut wirkt, erfolgt keine Änderung der Größe des Astigmatismus auf diesem steilen Meridian. Er verursacht jedoch eine Änderung der Größe des Gesamtastigmatismus sowie seiner Achse. Als Beispiel eines SIA, der in einer anderen Achse als die steile Achse wirkt, lässt sich der Fall anführen, wonach der Hauptschnitt einer Kataraktoperation auf einer anderen Achse als jener des steilen Meridians positioniert ist.

Der Torque wird kalkuliert durch folgende Formel:

$$\text{Torque} = \text{SIA} \sin(\text{AE}) \quad [130][\text{Alpins}, 1993].$$

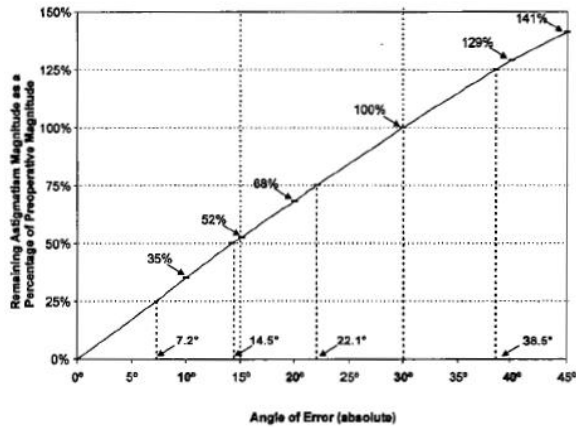
Wenn der Torque-Effekt positive Werte aufweist, liegt er CCW zum SIA, während er bei negativen Werten CW zum SIA liegt [129][Alpins, 1993].

Die Zusammenhänge zwischen Abflachungsindex (FI) und Winkelfehler (AE), Größe des Restastigmatismus und Winkelfehler (AE) sowie Achsendrehung des Restastigmatismus und Winkelfehler (AE) werden in den folgenden Diagrammen von Alpins dargestellt [130]:



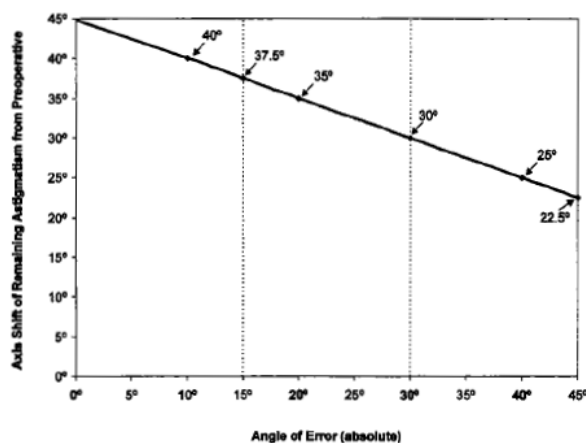
**Abbildung 40:** Der Effekt der Achsenabweichung bei der Astigmatismuskorrektur auf den Abflachungsindex (Alpins N., *Vector analysis of astigmatism changes by flattening, steepening, and torque*, J Cataract Refract Surg, Dez 1997, Band 23, S. 1512, mit freundlicher Genehmigung von Dr. Alpins)

Dem o. g. Diagramm lässt sich entnehmen, dass im Falle einer Achsenabweichung der Astigmatismuskorrektur von 45° der Abflachungseffekt auf der Zielachse gleich null ist. Auf dieser Achse liegt keine messbare Änderung des Astigmatismus vor. Es bewirkt lediglich eine Torque.



**Abbildung 41:** Der Effekt der Achsenabweichung bei der Astigmatismuskorrektur auf die Größe des Restastigmatismus  
 (Alpins N., *Vector analysis of astigmatism changes by flattening, steepening, and torque*, J Cataract Refract Surg, Dez 1997, Band 23, S. 1512, mit freundlicher Genehmigung von Dr. Alpins)

Dem o. g. Diagramm ist zu entnehmen, dass bei einer Achsenabweichung der Astigmatismuskorrektur von 30° der präoperative Astigmatismus überhaupt nicht reduziert ist. Stattdessen verschiebt sich die Astigmatismusachse um 30° in Richtung der Behandlungsachse, wie es auf **Abbildung 42** ersichtlich ist.



**Abbildung 42:** Der Effekt der Achsenabweichung bei der Astigmatismuskorrektur auf die Achse des Restastigmatismus  
 (Alpins N., *Vector analysis of astigmatism changes by flattening, steepening, and torque*, J Cataract Refract Surg, Dez 1997, Band 23, S. 1512, mit freundlicher Genehmigung von Dr. Alpins)



Alle drei oben dargestellten Abbildungen zeigen, dass der Zusammenhang zwischen Achsenabweichung der geplanten Astigmatismuskorrektur und dem Abflachungseffekt nicht linear ist.

Jeder astigmatismusreduzierende Eingriff, der innerhalb von  $45^\circ$  zu seiner gezielten Achse wirkt, verursacht eine Abflachung und einen Torque-Effekt. Ein AE von bis zu  $45^\circ$  bedeutet somit eine Unterkorrektur, über  $45^\circ$  eine Überkorrektur des vorhandenen Astigmatismus [130][Alpins, 1997].

- Nomogramm-Parameter:

Es handelt sich dabei um einen zusätzlichen Parameter, der durch Berücksichtigung von empirischen Werten auf die Optimierung der Astigmatismuskorrektur in weiteren Behandlungen zielt.

- CA (Coefficient of Adjustment): Der Anpassungskoeffizient

wird kalkuliert durch das Dividieren von TIA durch SIA und ist die umgekehrte Zahl des CI. Abhängig von den Werten des CA kann eine künftige Astigmatismusbehandlung durch Anpassung der Größe des TIA erfolgen.

Idealerweise beträgt der Wert 1.

Ein CA mit dem Wert von 1 sagt aus, dass kein ME vorliegt und somit keine Notwendigkeit für künftige Anpassungen des präoperativen Plans besteht.

Ein Wert größer als 1 zeigt, dass die Größe unterkorrigiert blieb, während Werte kleiner als 1 eine Überkorrektur verdeutlichen.

Der CA kann für eine Gruppe von Patienten durch den geometrischen Mittelwert berechnet werden. Der geometrische Mittelwert ist der Antilogarithmus des Mittelwertes der Logarithmen der einzelnen CA der Gruppe. Wenn er signifikant von 1 abweicht, liegt eine Tendenz zur Über- oder Unterkorrektur vor [129][Alpins, 1993].

Errors of treatment: Die Behandlungsfehler

beschreiben die arithmetische Differenz zwischen SIA und TIA in Größe und Achse:

- ME: (Magnitude of Error) Größe des Fehlers  
beschreibt die arithmetische Differenz der Größe zwischen SIA und TIA.  
Ein positiver Wert des ME entspricht einer Überkorrektur, ein negativer einer Unterkorrektur.
  
- AE (Angle of Error): Der Winkelfehler  
beschreibt den Winkel zwischen dem Vektor der erreichten Korrektur und dem Vektor der angestrebten Korrektur.  
Der AE ist positiv, wenn die erreichte Korrektur CCW zur angestrebten Achse liegt, und negativ, wenn die erreichte Korrektur CW zur angestrebten Achse liegt.  
In der Auswertung von mehreren Operationen kann der AE eine Tendenz zu einer bestimmten Achse zeigen, welche auf einen technikbedingten oder einen maschinellen Fehler hinweisen könnte. Demgegenüber weist eine randomisierte Verteilung von positiven und negativen Werten darauf hin, dass individuelle Faktoren dafür verantwortlich sind [129][Alpins, 1993].
  - Sowohl ME als auch AE sind standardisierte Parameter, welche für eine Serie von mehreren refraktiven Operationen kalkulierbar und vergleichbar sind. Sie zeigen eine mögliche Tendenz einer bestimmten Technik. Der Mittelwert und die Standardabweichung der ME und AE sind kalkulierbar und ermöglichen eine statistische Auswertung. Somit können die zwei Komponenten des operativen Fehlers, d. h. Größe und Achse, getrennt analysiert werden und es kann auf Modifikationen zur Verbesserung des ursprünglichen operativen Plans hingewiesen werden. Dadurch ist eine Verbesserung der nachfolgenden Operationen möglich. Durch die Berechnung der Differenz zwischen ME bzw.

AE und null kann der Erfolg von mehreren Operationen in einer Gruppe ausgewertet werden [129][Alpins, 1993]. Wenn der AE-Mittelwert nah bei null liegt, liegen keine signifikanten systemischen Orientierungsfehler des operativen Verfahrens vor [123][Alpins, 2001].

- Um den Effekt der künftigen Operationen auf die Größe des Astigmatismus zu modifizieren, können theoretisch die Zahl der Inzisionen, der Durchmesser der optischen Zone, die Länge oder die Tiefe der Inzisionen modifiziert werden [129][Alpins, 1993].

Weitere Parameter zum Vergleich der sphärischen Änderungen auf Hornhautebene sind folgende:

- S.CI (Spherical Correction Index): Der Index der sphärischen Korrektur  
= induzierte Korrektur des sphärischen Äquivalents/ angestrebte Korrektur des sphärischen Äquivalents
- S.Diff (Spherical Difference): Die sphärische Differenz  
= [erreichtes sphärisches Äquivalent - angestrebtes sphärisches Äquivalent] (absolut)
- S.IOS (Spherical Index of Success): Der sphärische Erfolgsindex  
= sphärische Differenz/ angestrebte Korrektur des sphärischen Äquivalents
- Ausdruck der Indizes in Prozentsätzen:
  - Prozent der astigmatischen Korrektur =  $CI \cdot 100$
  - Prozent der astigmatischen Reduktion auf der gezielten Achse =  $FI \cdot 100$
  - Prozent des Erfolgs der Astigmatismusbehandlung =  $(1 - IOS) \cdot 100$
  - Prozent der korrigierten Sphäre =  $SCI \cdot 100$
  - Prozent des Erfolgs der sphärischen Behandlung =  $(1 - S.IOS) \cdot 100$

Die o. g. Parameter wurden in diesem Kapitel zur ausführlichen Auswertung der Ergebnisse nach refraktiven Eingriffen kalkuliert und graphisch dargestellt.

Folgende wichtige Gesichtspunkte wurden ebenfalls berücksichtigt:

- Es ist sinnlos, den arithmetischen Mittelwert des Astigmatismus sowie sonstiger Vektoren zu berechnen [131][*Alpins et al, 2004*].  
Ein „Mittelwert“ von Vektorengrößen kann durch den sog. „*summated vectorial mean*“ (der summierte Mittelwert der Vektoren, auch „*centroid*“ genannt) berechnet werden. Er wird im Verhältnis zur entsprechenden Achse kalkuliert und ist immer kleiner als der arithmetische Mittelwert der Vektoren.  
Je näher der „*summated vector mean*“ der DV bei null liegt (d. h. je größer der Unterschied zwischen arithmetischem Mittelwert und „*summated vector mean*“), desto wahrscheinlicher ist es, dass ein Zufall und kein systematischer Fehler vorliegt [131][*Alpins et al, 2004*].
- Wenn mehrere Patienten analysiert werden, sind Vektoren am besten durch Streudiagramme dargestellt [129][*Alpins, 1993*].
- Die korneale Ebene stellt die primäre Ebene zur operativen Modifizierung des Astigmatismus dar, während die Brillenleistenebene die sekundäre Ebene zur Modifizierung des refraktiven Restastigmatismus ist. Die präoperative sowie die postoperative Refraktion der Patienten wurden auf Brillenleistenebene durchgeführt. Um die refraktiven mit den topographischen Ergebnissen vergleichen zu können, wurden zunächst die refraktiven Werte auf die korneale Ebene umgerechnet. Diese Kalkulationen wurden durchgeführt, nachdem die Sphäre und der Zylinder der refraktiven Werte jeweils in die Kreuzzylinderform konvertiert worden sind. Anschließend wurde folgende Formel angewandt [132][*Holladay et al, 1998*]:

$$\text{REFc} = \frac{1000 \cdot \text{REFb}}{1000 - \text{REFb} \cdot \text{Scheitelabstand (mm)}}$$

REFc = Refraktion auf kornealer Ebene

REFb = Refraktion auf Brillenebene

Scheitelabstand = 14 mm

- Die refraktiven sowie die topographischen Werte werden immer auf dem steilen Meridian und somit auf dem wirkenden Meridian notiert [133][Holladay et al, 1998], [134][Naeser, 2004].
- Alle vorhandenen Messungen in der Gruppenauswertung wurden statistisch mittels Berechnung des Mittelwertes und des 95 % Vertrauensbereichs des Mittelwertes bearbeitet. Der Vertrauensbereich ist die Breite der Messungen, in der jemand mit 95 % Wahrscheinlichkeit den Mittelwert der Gruppe finden kann.
- In sonstigen Tests zur Korrelation von zwei Parametern wird üblicherweise als Signifikanzniveau ( $\alpha$ ) ein p-Wert von  $\leq 0,05$  festgelegt. In dieser Studie muss jedoch berücksichtigt werden, dass eine größere Anzahl an Signifikanztests („multiples Testen“) durchgeführt worden ist. Beim „multiplen Testen“ muss dabei eine Adjustierung des Wertes  $\alpha$  erfolgen. Im Deutschen Ärzteblatt [135] wird dieses Thema ausführlicher erklärt:  
„Das Auftreten mehrerer p-Werte in einer Studie entsteht in der Regel durch das sogenannte „multiple Testen“. [...] Generell sollte man Ergebnisse aus Publikationen mit vielen „Signifikanzen“, in denen der Autor nicht das Problem des „multiplen Testens“ durch adäquate Methoden berücksichtigt hat, vorsichtig bewerten. [...] Die Möglichkeit eines Fehlers (Irrtumswahrscheinlichkeit) bleibt bei Annahme der Gültigkeit der Hypothese immer, denn es wurde nur eine Stichprobe untersucht. [...] In der Regel legt man die maximal tolerable Irrtumswahrscheinlichkeit, das sogenannte Signifikanzniveau ( $\alpha$ ), auf 5 % fest. [...] Liegt der p-Wert unterhalb des Signifikanzniveaus, so gilt die Hypothese mit ma-

ximaler Irrtumswahrscheinlichkeit von  $\alpha$  als abgesichert und angenommen. Liegt er darüber, so kann die Hypothese nicht als bestätigt gelten. [...]

Das Problem ist, dass in einer Stichprobe zufällig auffällige Werte zustande kommen können, auch wenn die Nullhypothese tatsächlich wahr ist. Nimmt man die Hypothese an, obwohl sie nicht wahr ist, unterliegt man einem Irrtum, man spricht vom Fehler erster Art. [...]

Was passiert, wenn mehrere Hypothesen an demselben Kollektiv gleichzeitig getestet werden? Die Wahrscheinlichkeit, eine Falschaussage zu machen, steigt mit der Anzahl der durchgeführten Tests, denn man kann sich bei jedem Test irren. [...]

Um die Flut falschpositiver Ergebnisse in der medizinischen Forschung einzudämmen, sind Maßnahmen zur Kontrolle der Irrtumswahrscheinlichkeit bezogen auf alle untersuchten Hypothesen nötig. Anstatt das Niveau nur jedes einzelnen Tests zu betrachten, gibt es daher die Definition der FWER („familywise error rate“). Sie beschreibt die Wahrscheinlichkeit, dass man mindestens eine von allen untersuchten Nullhypothesen fälschlich ablehnt. [...]

Wie kontrolliert man die FWER? Anstatt jeden p-Wert mit dem Gesamtniveau  $\alpha$  zu vergleichen, muss man eine kleinere Grenze für jeden einzelnen p-Wert ansetzen. [...]

Die wohl bekannteste Methode zur Kontrolle der FWER ist die nach Bonferroni. Damit der Gesamtfehler (die Wahrscheinlichkeit, mindestens eine falschpositive Aussage zu machen = die FWER) nicht  $\alpha$  (zum Beispiel 5 %) überschreitet, teilt man das multiple Gesamtniveau durch die Anzahl durchgeführter Tests und vergleicht jeden p-Wert mit dieser kleineren Schranke. Ist zum Beispiel die Anzahl untersuchter Hypothesen 100 und das gewählte Gesamtniveau 5 %, so ist der p-Wert jedes Tests (jeder Hypothese) mit  $5\%/100 = 0,0005$  zu vergleichen.“

In unserer Studie werden insgesamt 30 Vergleiche durchgeführt. Um die Wahrscheinlichkeit, eine falschpositive Aussage zu treffen, zu vermeiden, wird das Gesamtniveau  $\alpha$  nach Bonferroni auf  $0,05/30 = 0,0017$  reduziert.

- Der Grad der Kovariation zwischen zwei Verteilungen wurde durch die Berechnung des Korrelationskoeffizientes ( $r$ ) berechnet.
- Inzisionelle operative Verfahren bewirken eine „Gewebe-Addierung“, während nichtinzisionelle Verfahren (z. B. Laserchirurgie) eine „Gewebe-Ablation“ bewirken [130][*Alpins*, 1997].
- Wenn Mittelwerte berechnet werden, können diese entweder arithmetische Mittelwerte sein (Werte mit positivem oder negativem Vorzeichen) und somit sensibel für arithmetische Tendenzen, oder absolute Mittelwerte (absolute Werte berechnet), welche eine totale Ausbreitung des vorliegenden Fehlers zeigen [131][*Alpins et al*, 2004].

### 3. Ergebnisse

Dieses Kapitel umfasst neben der Vorstellung von Ergebnissen zugleich einen Teil der Diskussion über ihre klinische Bedeutung. Es wurden bewusst Teile der Diskussion bereits in das Kapitel „Ergebnisse“ integriert, sodass die Schlussfolgerungen direkt nach der Vorstellung der Ergebnisse leichter verständlich sind. Eine Zusammenfassung der diskutierten Ergebnisse wird sodann in dem Kapitel „Diskussion“ erfolgen.

#### 3.1 Das zeitliche Verhalten der PCCRI (Periphere Clear-Cornea-Relaxationsinzisionen)

Wenn die bereits erwähnten theoretischen Grundlagen bezüglich der Anatomie und Biomechanik der Hornhaut sowie der kornealen Wundheilung nach keratorefraktiven Eingriffen zugrunde gelegt werden, stellt sich die Frage nach dem zeitlichen Verhalten der astigmatismuskorrigierenden Hornhautinzisionen.

Die Frage, ob die Ergebnisse im zeitlichen Verlauf stabil sind, ist dabei vorrangig. Vielleicht liegt anfangs ein höherer astigmatismusreduzierender Effekt vor, welcher im Verlauf einen Regress zeigt. Ebenso könnten die erwähnten unterschiedlichen Stadien der Wundheilung der Hornhaut einen Effekt auf den praktischen Erfolg der Operation erzielen. Diese Arbeit beschäftigt sich mit derartigen Fragen und soll den besten Zeitpunkt aufzeigen, zu welchem die postoperative Verlaufskontrolle nach einer Phakoemulsifikation mit astigmatismusreduzierenden Maßnahmen stattfinden sollte, um den endgültigen Befund des operativen Eingriffes optimal beurteilen zu können.

Die o. g. Fragestellungen führten uns zu der Erstellung und Auswertung der Gruppe Ia. Hier wurden im Sinne der Vollständigkeit der präoperativen und postoperativen Daten die Patienten standardisiert an folgenden postoperativen Terminen untersucht: erste Woche, erster Monat, dritter Monat sowie sechster Monat nach der Operation. Die operativen Ergebnisse wurden mittels der Astigmatismusanalyse, die in Kapitel „Astigmatismusanalyse“ präsentiert wurde, ausgewertet; ebenfalls wurden die Indizes des Erfolges be-

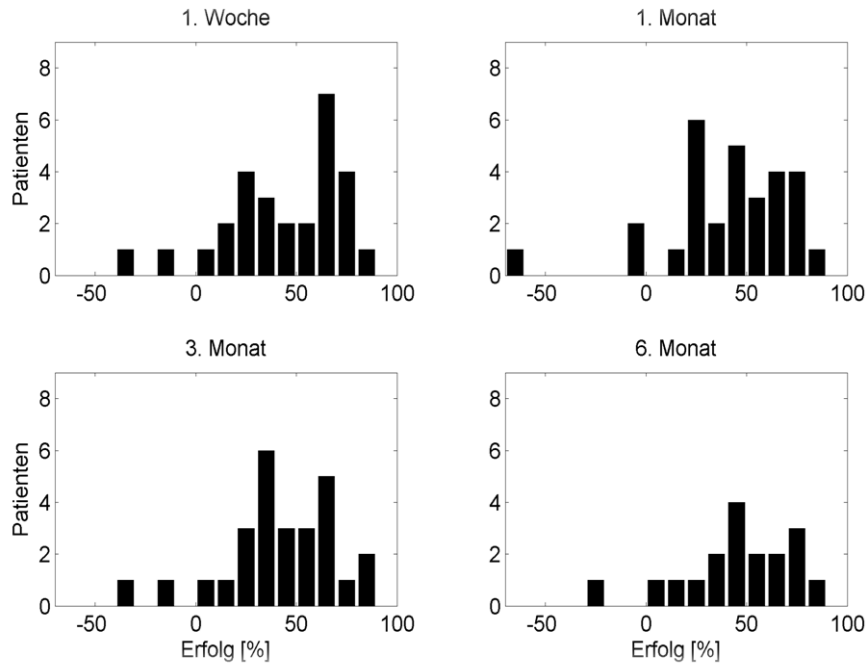


rechnet. Als Erfolgsmaß wurde der IOS („*Index of Success*“) für die o. g. postoperativen Zeitintervalle berechnet und statistisch ausgewertet. Die Nullhypothese, dass der Mittelwert der IOS nach der ersten postoperativen Woche, dem ersten postoperativen Monat, dem dritten postoperativen Monat und dem sechsten postoperativen Monat gleich bleibt, konnte sowohl nach Anwendung des ANOVA-Tests als auch nach Anwendung des Kruskal-Wallis-Tests (KW-Test) nicht verworfen werden (ANOVA  $p = 0,94$ , KW-Test  $p = 0,90$ ). Da die Nullhypothese nicht verworfen werden kann, lässt sich schlussfolgern, dass der IOS im Verlauf gleich bleibt (Abbildung 43, Abbildung 44).

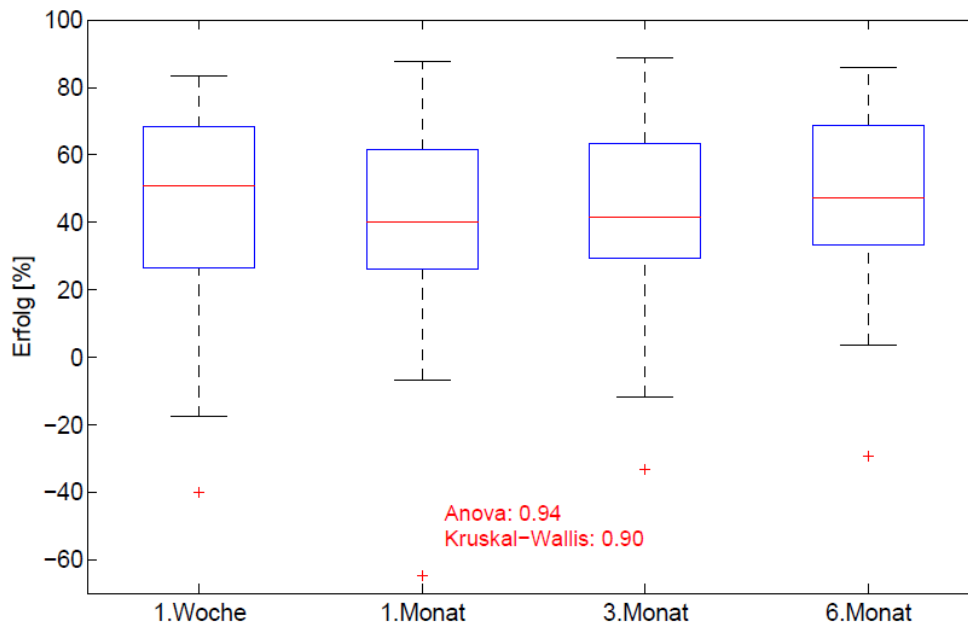
Der ANOVA-Test („*Analysis of Variance*“) testet auf Gleichwertigkeit der Mittelwerte verschiedener Gruppen. Voraussetzung für die korrekte Anwendung des Tests ist eine Normalverteilung der Werte der einzelnen Gruppen [136][Handl, 2002].

Der Kruskal-Wallis-Test testet auf Gleichwertigkeit der Mediane verschiedener Gruppen. Hier wird für die korrekte Anwendung dieses Tests eine Normalverteilung der Werte der einzelnen Gruppen nicht vorausgesetzt [136][Handl, 2002].

Des Weiteren wird die statistische Signifikanz der Unterschiede zwischen unterschiedlichen Gruppen nach Anwendung des Kruskal-Wallis-Tests überprüft, da eine Normalverteilung der Werte nicht garantiert werden kann.



**Abbildung 43:** Der Effekt der PCCI im zeitlichen Verlauf  
 Prozentualer Erfolg der topographischen Astigmatismusreduktion durch PCCRI  
 zu unterschiedlichen postoperativen Zeitpunkten  
 (1. Woche, 1. Monat, 3. Monat, 6. Monat), Gruppe Ia



**Abbildung 44:** Das zeitliche Verhalten des Effektes der PCCRI  
 Statistischer Vergleich des prozentualen Erfolgs der topographischen  
 Astigmatismusreduktion durch PCCRI zu unterschiedlichen postoperativen Zeitpunkten  
 (1. Woche, 1. Monat, 3. Monat, 6. Monat), Gruppe Ia

Das bedeutet, dass kein statistisch signifikanter Unterschied zwischen den Mittelwerten der IOS in den unterschiedlichen postoperativen Zeitpunkten aufgezeigt werden kann.

Die gleiche Schlussfolgerung ergibt sich durch den Vergleich der IOS zu unterschiedlichen Zeitpunkten der Nachkontrollen in Paare (z. B. 1. Woche vs. 1. Monat), unabhängig von welcher Kombination.

1. Woche vs. 1. Monat ( $p = 0,23$ )

1. Woche vs. 3. Monat ( $p = 0,75$ )

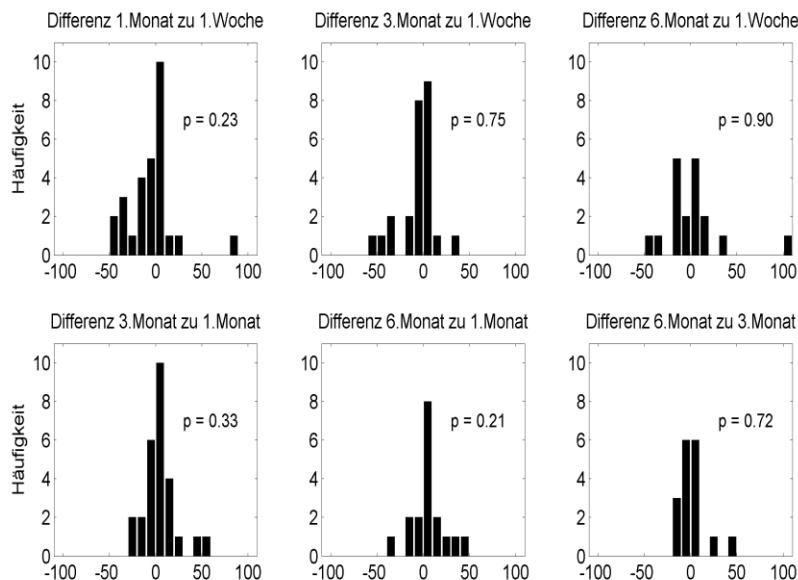
1. Woche vs. 6. Monat ( $p = 0,90$ )

1. Monat vs. 3. Monat ( $p = 0,33$ )

1. Monat vs. 6. Monat ( $p = 0,21$ )

3. Monat vs. 6. Monat ( $p = 0,72$ )

Wie aus der Abbildung 45 hervorgeht, zeigen die IOS Werte keine signifikante Differenz im zeitlichen Verlauf:



**Abbildung 45:** Statistischer Vergleich des Effektes der PCCRl im zeitlichen Verlauf

Statistischer Vergleich der Differenzen des prozentualen Erfolgs [(1-IOS)\*100] der topographischen Astigmatismusreduktion durch PCCRl zu unterschiedlichen postoperativen Zeitpunkten, Gruppe Ia

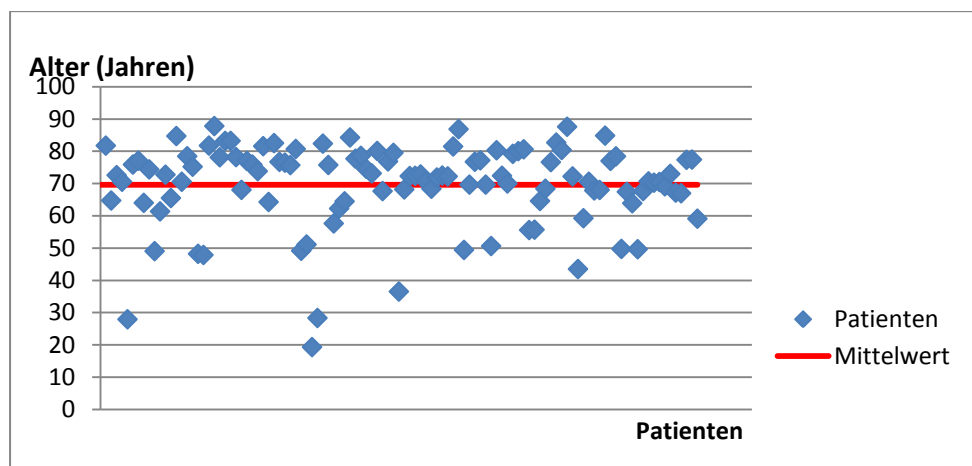
Darauf basierend erfolgte sodann die Auswertung des Effektes der peripheren Clear-Cornea-Relaxationsinzisionen (PCCRI) im gesamten Patientengut der Gruppe I (110 Augen), wobei während eines Zeitraums von einer Woche bis zu sechs Monaten postoperativ eine Kontrolle erfolgte.

### 3.2 Gruppe I: PCCRI

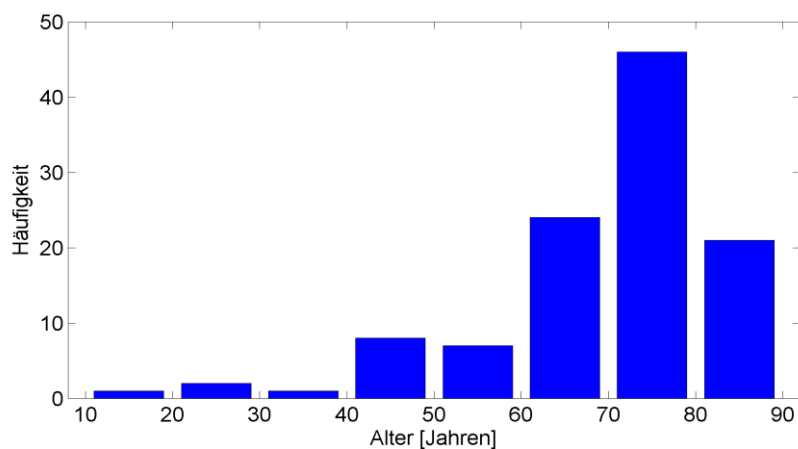
#### 3.2.1 Biometrische Auswertung

##### Alter

Das mittlere Alter der Patienten der Gruppe I betrug 69,67 Jahre. Der jüngste Patient war 19,29 Jahre und der älteste 87,79 Jahre alt.



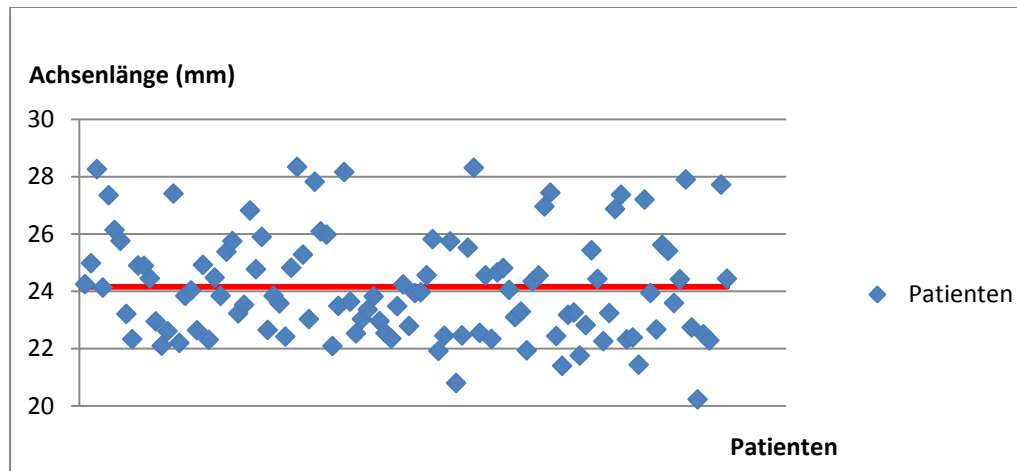
**Abbildung 46:** Die Verteilung des Alters der Patienten am Tag der Operation, Gruppe I



**Abbildung 47:** Die Häufigkeit des Alters am Tag der Operation, Gruppe I

Achsenlänge

Der Mittelwert der Achsenlänge der operierten Augen betrug 24,16 mm (Minimum 20,23 mm, Maximum 28,34 mm).

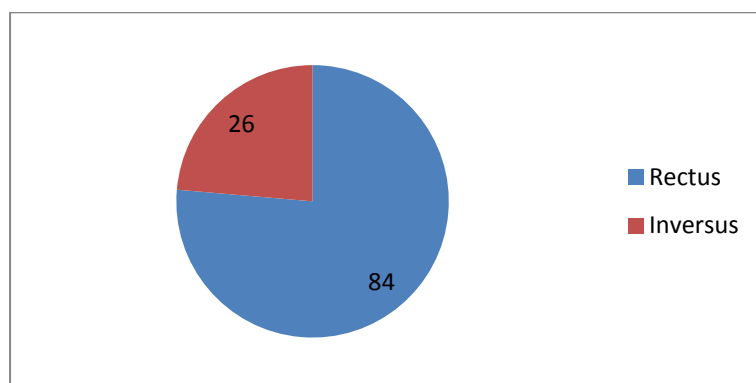


**Abbildung 48:** Die Verteilung der Achsenlänge, Gruppe I

Form des Astigmatismus

84 Augen (76,4 %) zeigten präoperativ topographisch einen Astigmatismus rectus.

26 Augen (23,6 %) zeigten präoperativ topographisch einen Astigmatismus inversus.



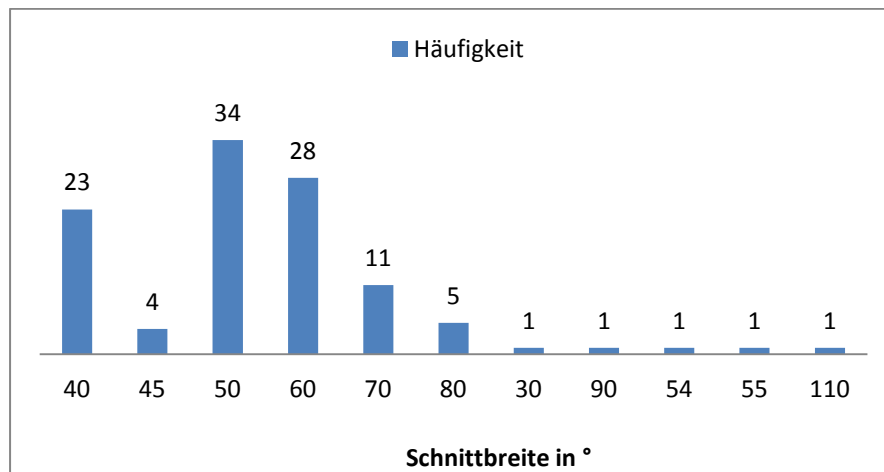
**Abbildung 49:** Die Verteilung der Form des präoperativen topographischen Astigmatismus, Gruppe I

Die Patienten werden, abhängig von der Achse des präoperativ vorliegenden topographischen Astigmatismus, in zwei Subgruppen unterteilt (Subgruppe 1:

0°-44° oder 145°-180°; Subgruppe 2: 45°-144°). Es wird somit für die Planung der PCCRl nicht die strenge Definition des Astigmatismus rectus, inversus und obliquus übernommen. Für die statistische Auswertung der Ergebnisse ist es deshalb sinnvoll, die Patienten in diese zwei Subgruppen zu unterteilen. Aus Vereinfachungsgründen wird im Folgenden der Astigmatismus der Subgruppe 1 (0°-44° oder 145°-180°) Astigmatismus inversus und der Astigmatismus der Subgruppe 2 (45°-144°) Astigmatismus rectus genannt.

### Breite der PCCRl

Das folgende Diagramm zeigt die geplante Breite der PCCRl:

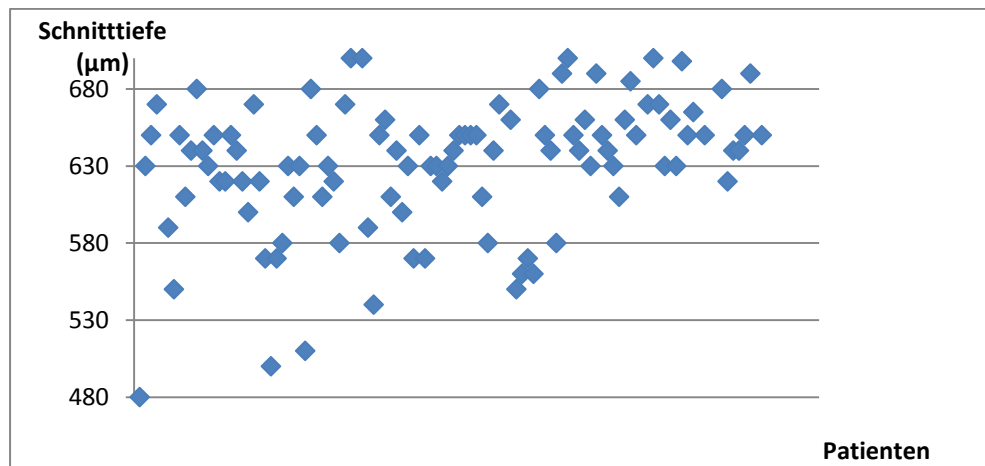


**Abbildung 50:** Die Verteilung der geplanten Schnittbreite, Gruppe I

Bei der Mehrheit der Patienten wurden Hornhautinzisionen mit einer geplanten Breite von 40°, 50° oder 60° durchgeführt. Der Mittelwert der geplanten Schnittbreite lag bei  $54,40^\circ \pm 12,59^\circ$ .

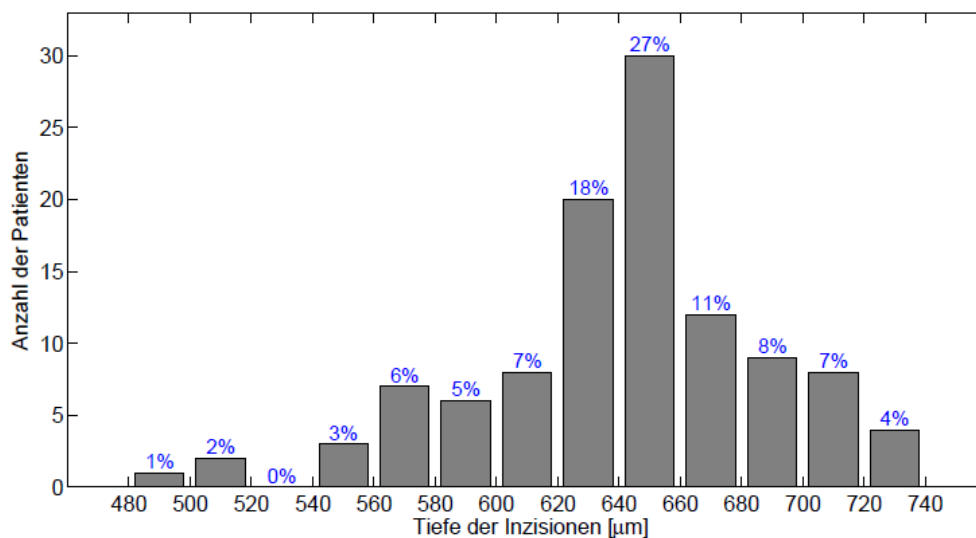
### Tiefe der PCCRI

Das nachstehende Diagramm zeigt die geplante Tiefe der PCCRI:



**Abbildung 51:** Die Verteilung der geplanten Schnitttiefe, Gruppe I

Der Mittelwert der geplanten Schnitttiefe lag bei  $637,03 \mu\text{m} \pm 47,51$ . Die Verteilung der geplanten Tiefe der Hornhautinzisionen ist in folgendem Diagramm dargestellt:



**Abbildung 52:** Die Häufigkeit der geplanten Schnitttiefe, Gruppe I

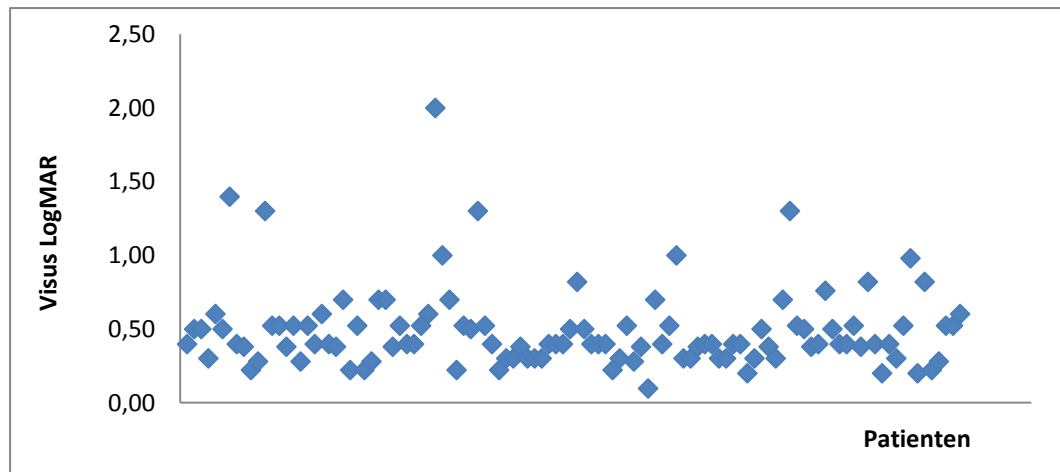
Dem oberen Diagramm ist zu entnehmen, dass in unserer Klinik bei der Planung der astigmatismuskorrigierenden Hornhautinzisionen zumeist eine Schnitttiefe größer als  $600 \mu\text{m}$  vorgesehen war. Für 82 % der Patienten

wurden astigmatismuskorrigierende Hornhautinzisionen tiefer als 600  $\mu\text{m}$  geplant. Dies ist insofern bemerkenswert, als von manchen Autoren in der Literatur standardisierte Schnittiefen von 600  $\mu\text{m}$  vorgeschlagen werden.

Bei der Festlegung der Tiefe der Hornhautinzisionen anhand eines Nomogramms, welches Alter, Größe des Astigmatismus und Form des Astigmatismus (rectus oder inversus) berücksichtigt, lag diese meistens zwischen 600 und 660  $\mu\text{m}$  (52 % aller Inzisionen).

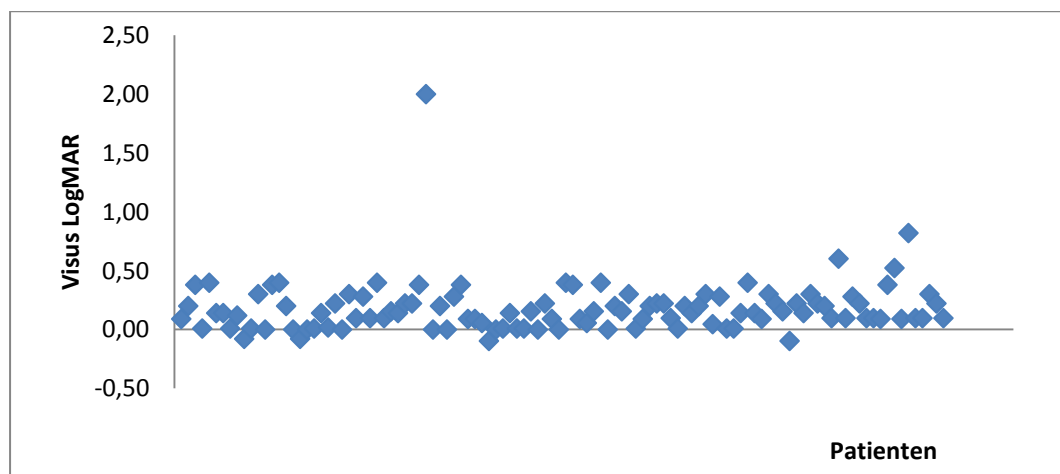
### Visus

Der mittlere bestkorrigierte LogMAR Visus betrug präoperativ 0,49.



**Abbildung 53:** Der bestkorrigierte präoperative LogMAR Visus (BCVAprä), Gruppe I

Der mittlere bestkorrigierte LogMAR Visus betrug postoperativ 0,1.



**Abbildung 54:** Der bestkorrigierte postoperative LogMAR Visus (BCVApst), Gruppe I

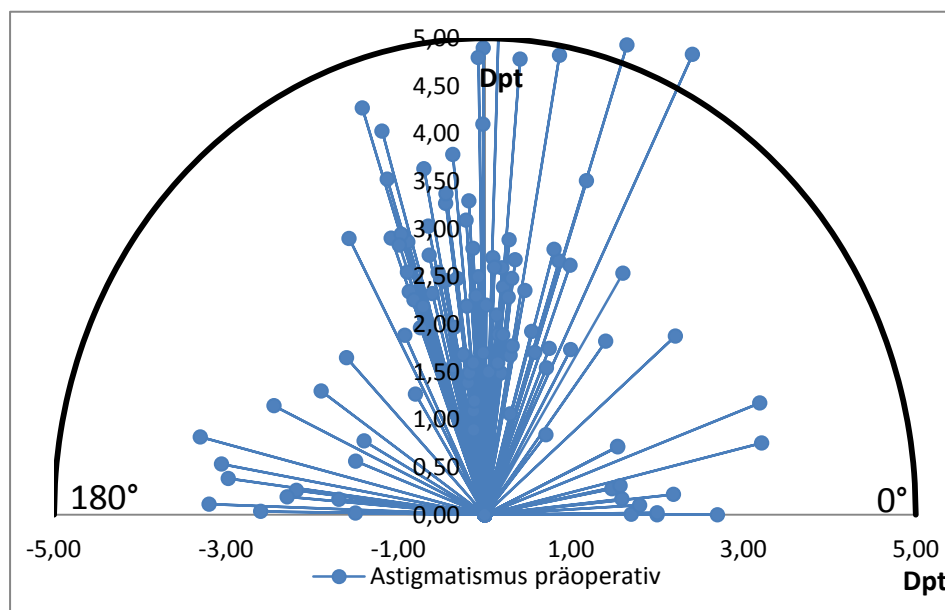


Die Auswertung der Ergebnisse der astigmatismusreduzierenden Hornhautinzisionen kann sowohl durch den Vergleich der kornealen (topographischen) Veränderungen als auch durch den Vergleich der subjektiv wahrgenommenen refraktiven Astigmatismuskorrektur erfolgen. Beide Auswertungen wurden für die Gruppe I durchgeführt.

### 3.2.2 Topographische Auswertung

Der arithmetische Mittelwert des präoperativen topographischen Astigmatismus lag bei 2,6 Dpt, SD  $\pm$  0,4 Dpt (Minimum 0,9 Dpt, Maximum 5,5 Dpt).

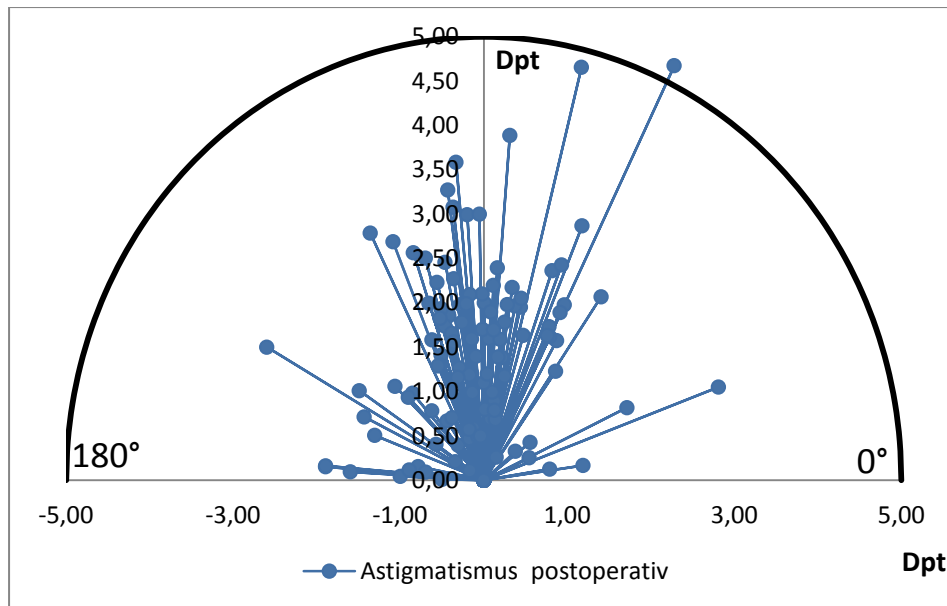
Der Vektor des präoperativen topographischen Astigmatismus für jedes Auge ist in folgendem Diagramm dargestellt:



**Abbildung 55:** Die Vektoren des präoperativen topographischen Astigmatismus, Gruppe I

Aus dem Diagramm lässt sich recht eindeutig ablesen, dass die Mehrheit der Augen topographisch einen Astigmatismus rectus zeigt.

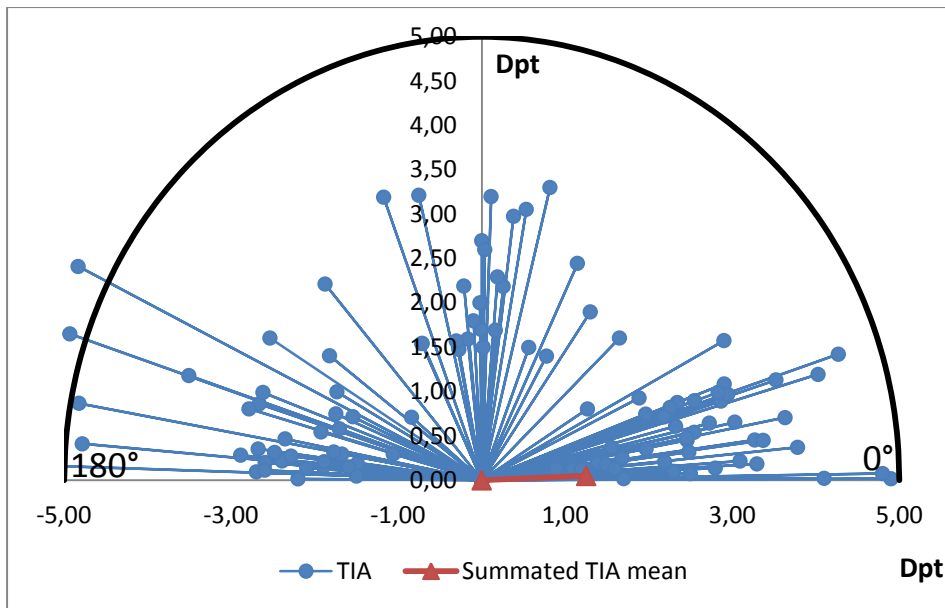
Der Mittelwert der Größe des postoperativen topographischen Astigmatismus betrug 1,7 Dpt, SD  $\pm$  0,91 Dpt (Minimum 0,2 Dpt, Maximum 5,2 Dpt).



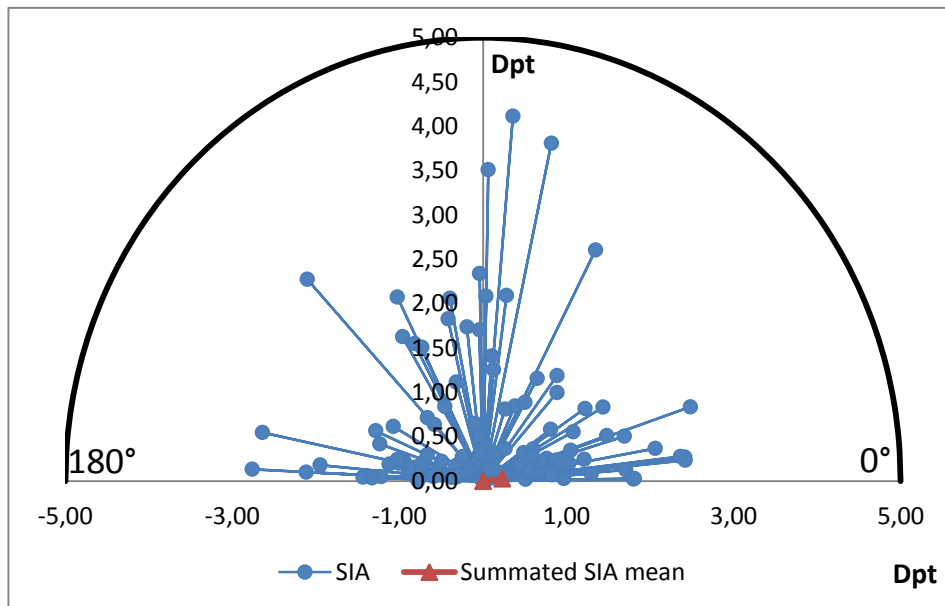
**Abbildung 56:** Die Vektoren des postoperativen topographischen Astigmatismus, Gruppe I

Wenn die Abbildung 55 und die Abbildung 56 miteinander verglichen werden, lässt sich im Wesentlichen daraus ableiten, dass es durch die astigmatismusreduzierenden Hornhautinzisionen insgesamt zu einer Reduktion des ursprünglich vorliegenden topographischen Astigmatismus kommt, jedoch die Effektivität der Methode nicht besonders hoch ist.

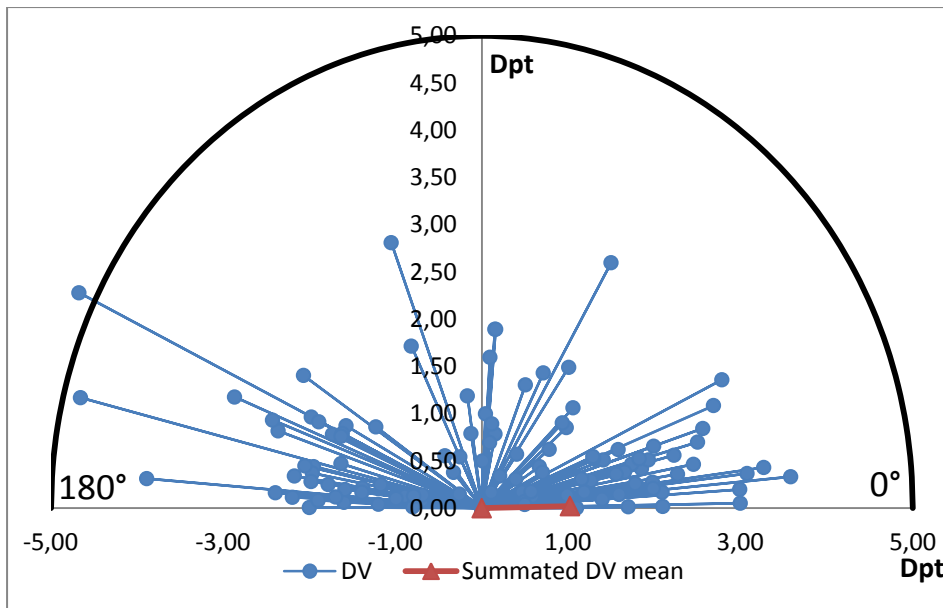
Es folgen weitere Diagramme, die den topographischen TIA, SIA und DV darstellen:



**Abbildung 57:** Die Vektorendarstellung der TIA, Gruppe I  
Die Vektorendarstellung der gezielten Astigmatismuserzeugung (TIA) auf der präoperativen Achse, sowie des „Summated Vector Mean“ für den TIA (1,25 Dpt/ 2,25°). Daten der topographischen Auswertung, Gruppe I

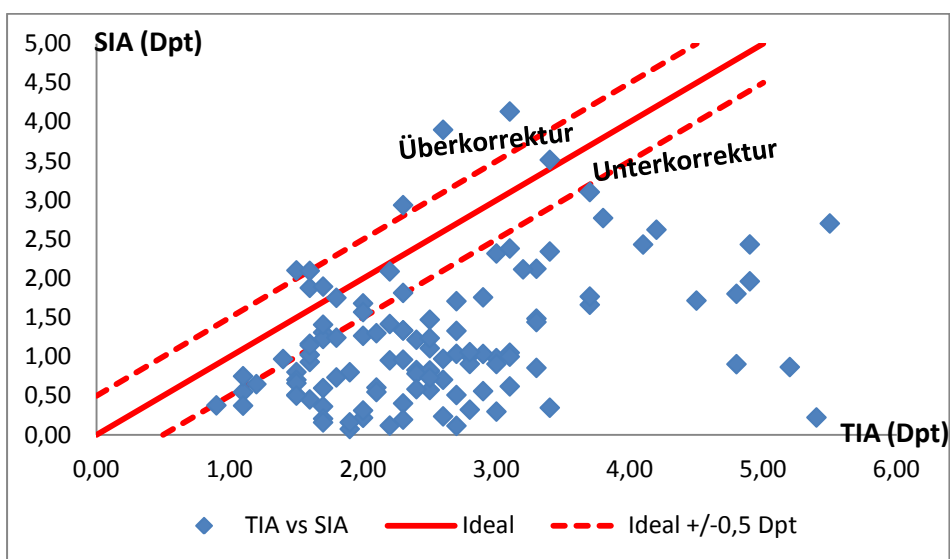


**Abbildung 58:** Die Vektorendarstellung der SIA, topographisch, Gruppe I  
Die Vektorendarstellung der erzeugten Astigmatismusveränderung (SIA) auf der präoperativen Achse, sowie des „Summated Vector Mean“ für den SIA (0,23 Dpt/ 6,83°). Daten der topographischen Auswertung, Gruppe I



**Abbildung 59:** Die Vektorendarstellung des DV, topographisch, Gruppe I  
Die Vektorendarstellung des Behandlungsfehlers (DV) auf der präoperativen Achse, sowie des „Summated Vector Mean“ für den DV (1,02 Dpt/ 1,22°). Daten der topographischen Auswertung, Gruppe I

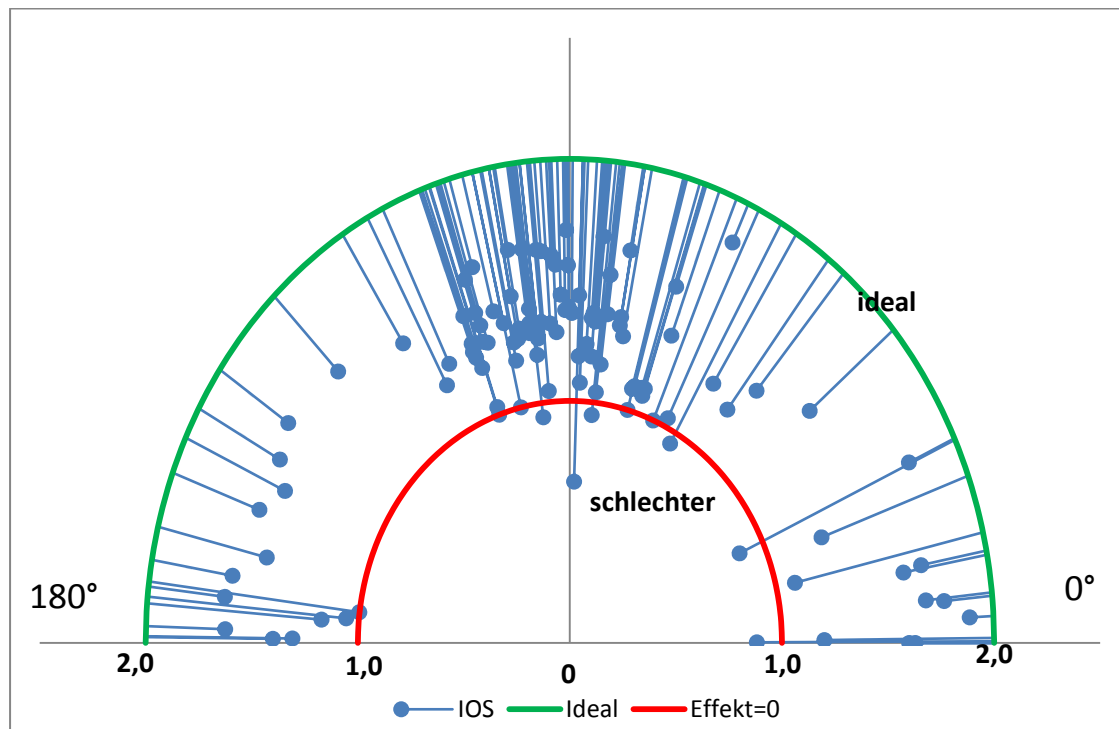
Die Korrelation zwischen topographischem SIA und TIA (Korrelationskoeffizient = 0,37,  $p = 0,0001$ ) wird durch das nachstehende Diagramm dargestellt. Punkte über der durchgezogenen Linie weisen dabei auf eine Überkorrektur hin, während jene unter der durchgezogenen Linie auf eine Unterkorrektur hinweisen. Die gestrichelten Linien grenzen den Bereich  $\pm 0,5$  Dpt ein. Es liegt eine statistisch signifikante Korrelation zwischen SIA und TIA vor.



**Abbildung 60:** Streudiagramm der TIA vs. SIA. Daten der topographischen Auswertung, Gruppe I

Hierdurch lässt sich erneut behaupten, dass PCCRI eine sichere Methode zur Astigmatismuskorrektur sind, da nur wenige Patienten (acht Augen) eine Überkorrektur erfuhren. Gleichzeitig ist aber anzumerken, dass die Effektivität der Methode nicht sehr hoch ist, da viele Augen in dem Bereich der Unterkorrektur liegen.

Der Ausdruck des entsprechenden topographischen IOS-Wertes für jeden Patienten auf der steilen Achse des präoperativen Astigmatismus ist in folgendem Diagramm dargestellt:



**Abbildung 61:** Der IOS auf der Achse der geplanten Korrektur, Daten der topographischen Auswertung, Gruppe I

Das Diagramm ist so zu verstehen: Je näher ein Punkt an der grünen Linie liegt, desto besser ist das Ergebnis der Operation. Der IOS ist idealerweise gleich null. Je größer die Entfernung des Punktes von der grünen Linie ist, desto weniger effektiv war die astigmatismuskorrigierende Maßnahme. Ein IOS gleich 1 (Abbildung: rote Linie) bedeutet somit keinen Erfolg. Je länger sich die radiären Linien darstellen, desto weniger erfolgreich war der Eingriff. Wenn der Punkt im Bereich innerhalb der roten Linie landet, ist der postoperative Astigmatismusbetrag höher als präoperativ.

Die Effektivität der PCCRI kann durch die Berechnung des Parameters „Erfolg der Astigmatismusreduktion“ ausgedrückt werden. Der „Erfolg der Astigmatismusreduktion“ wird als prozentualer Ausdruck der Differenz zwischen 1 und IOS, d. h.  $(1 - IOS) * 100 \%$ , für jeden Eingriff berechnet.

Der arithmetische Mittelwert für den topographischen „Erfolg der Astigmatismusreduktion“ in Gruppe I betrug 34,36 %. Das bedeutet, dass im Mittel durch die Durchführung der PCCRI der vorliegende topographische Astigmatismus um 34,36 % auf der bestehenden Achse reduziert werden konnte.

Es ist jedoch anzumerken, dass dieser Mittelwert sowohl durch positive als auch durch negative Werte beeinflusst wird.

Der Erfolg der Operation kann qualitativ in „Reduktion der Größe“, „keine Veränderung der Größe“, oder „Zunahme der Größe“ des bestehenden Astigmatismus eingeteilt werden. Entweder kommt es zu einer Reduktion der Größe des vorliegenden Astigmatismus („Erfolg der Astigmatismusreduktion“  $> 0$ ), zu keiner Veränderung („Erfolg der Astigmatismusreduktion“  $= 0$ ) oder zu einer Zunahme der Größe des bestehenden Astigmatismus auf der gewünschten Achse („Erfolg der Astigmatismusreduktion“  $< 0$ ).

In der Gruppe I (110 Augen) wurde an 99 Augen eine Reduktion, an fünf Augen keine Veränderung und an sechs Augen eine Zunahme der Größe des präoperativen topographischen Astigmatismus auf der ursprünglichen Achse festgestellt. Die negativen Werte des „Erfolges der Astigmatismusreduktion“ haben Auswirkungen auf die Berechnung des Mittelwertes und verfälschen die klinische Bedeutung des Mittelwertes. Dieses Problem kann durch die getrennte Berechnung des Mittelwertes gelöst werden. Wenn es zu einer topographischen Astigmatismusreduktion kommt („Erfolg der Astigmatismusreduktion“  $> 0$ ), wird der topographische Astigmatismus im Mittelwert um 38,9 % reduziert. Wenn der Effekt der PCCRI eine Zunahme der Größe des topographischen Astigmatismus bewirkt, wird er im Mittelwert um 10,43 % zunehmen.

Der mittlere topographische präoperative Astigmatismus betrug  $2,56 \pm 0,4$  Dpt, der entsprechende postoperative Astigmatismus  $1,7 \pm 0,91$  Dpt. Es kam zu einer mittleren Reduktion der Größe des bestehenden topographischen Astigmatismus um  $0,86 \pm 0,63$  Dpt.

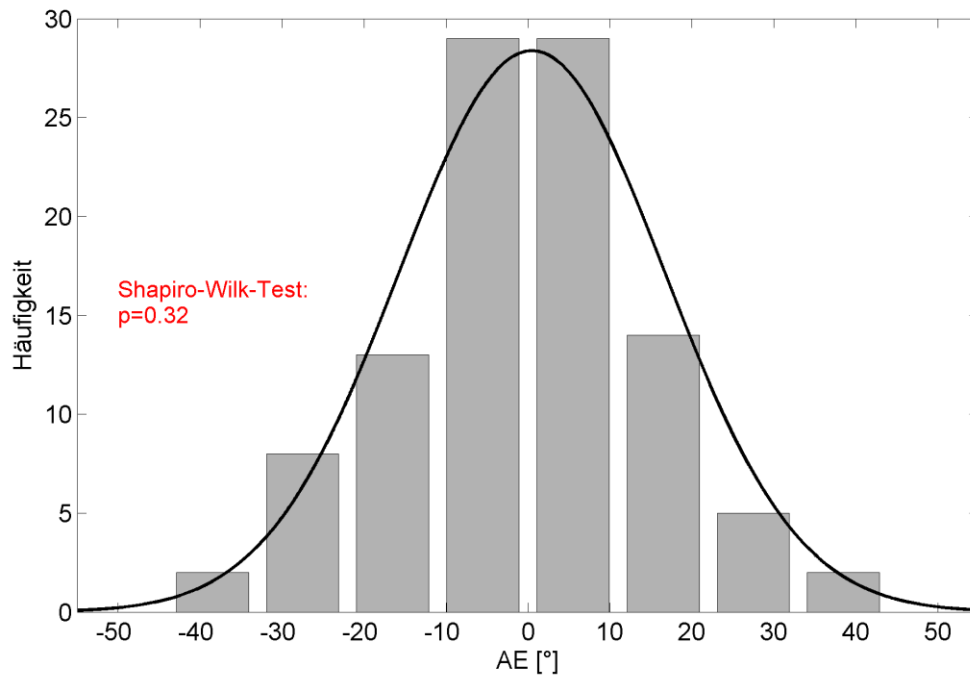
Ähnliche Ergebnisse ermittelten *Carvalho et al* [137] mit einer mittleren topographischen Reduktion von 0,91 Dpt (mittlerer präoperativer Astigmatismus  $1,93 \pm 0,58$  Dpt, mittlerer postoperativer Astigmatismus  $1,02 \pm 0,60$  Dpt).

Wie bereits erwähnt, „verursacht jeder astigmatismusreduzierende Eingriff, der innerhalb von  $45^\circ$  zu der gezielten Achse wirkt, eine Abflachung. Eine Abweichung (AE) von bis zu  $45^\circ$  bedeutet somit eine Unterkorrektur, während eine AE über  $45^\circ$  eine Überkorrektur des vorhandenen Astigmatismus bedeutet“ [130][*Alpins*, 1997].

*Alpins* [129] folgerte: Bei der Auswertung von mehreren Operationen kann die AE eine Tendenz zu einer Achse zeigen, welche auf einen technikbedingten oder einen maschinellen Fehler hinweisen könnte. Im Gegensatz dazu weist eine randomisierte Verteilung von positiven und negativen Werten darauf hin, dass lediglich individuelle Faktoren dafür verantwortlich sind.

Um eine mögliche Tendenz hin zu einer Achse entdecken zu können, stellten wir bezüglich der AE die Patienten mit einer Reduktion des bestehenden Astigmatismus ( $AE < 45$ ) getrennt von den Patienten mit einer  $AE > 45$  (Überkorrektur) in einem Diagramm dar.

Folgendes Diagramm zeigt eine Normalverteilung der AE zwischen  $-45^\circ$  und  $+45^\circ$ .



**Abbildung 62:** Die Häufigkeit der AE, Daten der topographischen Auswertung, Gruppe I

Der statistische Signifikanztest (Shapiro-Wilk-Test) zeigt, dass sich der Mittelwert der AE nicht signifikant von null unterscheidet.

Dadurch lässt sich belegen, dass die Streuung zwischen  $-45^\circ$  und  $+45^\circ$  einer Normalverteilung unterliegt und somit keine Tendenz zu einer Achse zeigt bzw. auf keinen technikbedingten oder maschinellen Fehler hinweist.

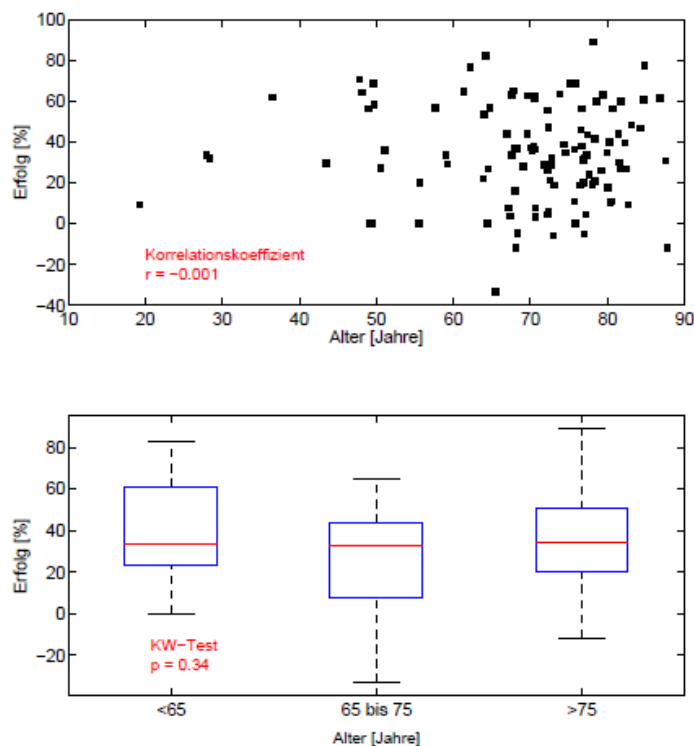


## Korrelationen

Die nächste Frage ist, ob die Ergebnisse der PCCRI abhängig von demographischen Faktoren sind und ob es einen statistisch signifikanten Unterschied für den Erfolg der Operation abhängig vom Alter der Patienten, von der Achsenlänge, von der geplanten Tiefe und der Breite der Inzisionen bzw. von der Form des Astigmatismus (rectus/ inversus) gibt. Um diese Fragen beantworten zu können, wurde folgende Auswertung durchgeführt:

## Alter

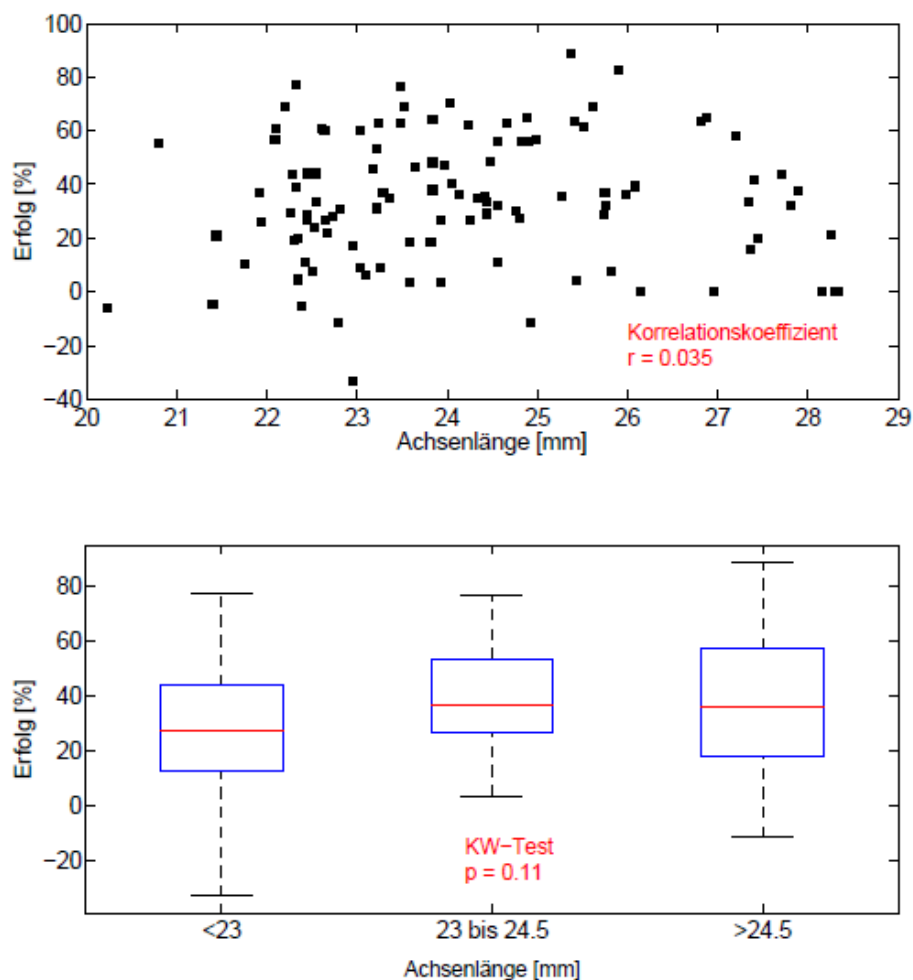
Bezüglich des Alters der Patienten zeigt das folgende Diagramm, dass keine Korrelation zwischen dem Alter am Tag der Operation und dem topographischen Erfolg der Operation besteht (Korrelationskoeffizient  $r = -0,001$ ). Auch nach Subgruppierung der Patienten in Alterssubgruppen (< 65, 65 bis 75, > 75 Jahre) zeigte sich kein signifikanter Unterschied des topographischen Erfolgs der Operationen zwischen den Subgruppen ( $p = 0,34$ ).



**Abbildung 63:** Die Korrelation zwischen dem Alter der Patienten am Tag der Operation und dem Erfolg der Astigmatismusreduktion, Daten der topographischen Auswertung, Gruppe I

### Achsenlänge

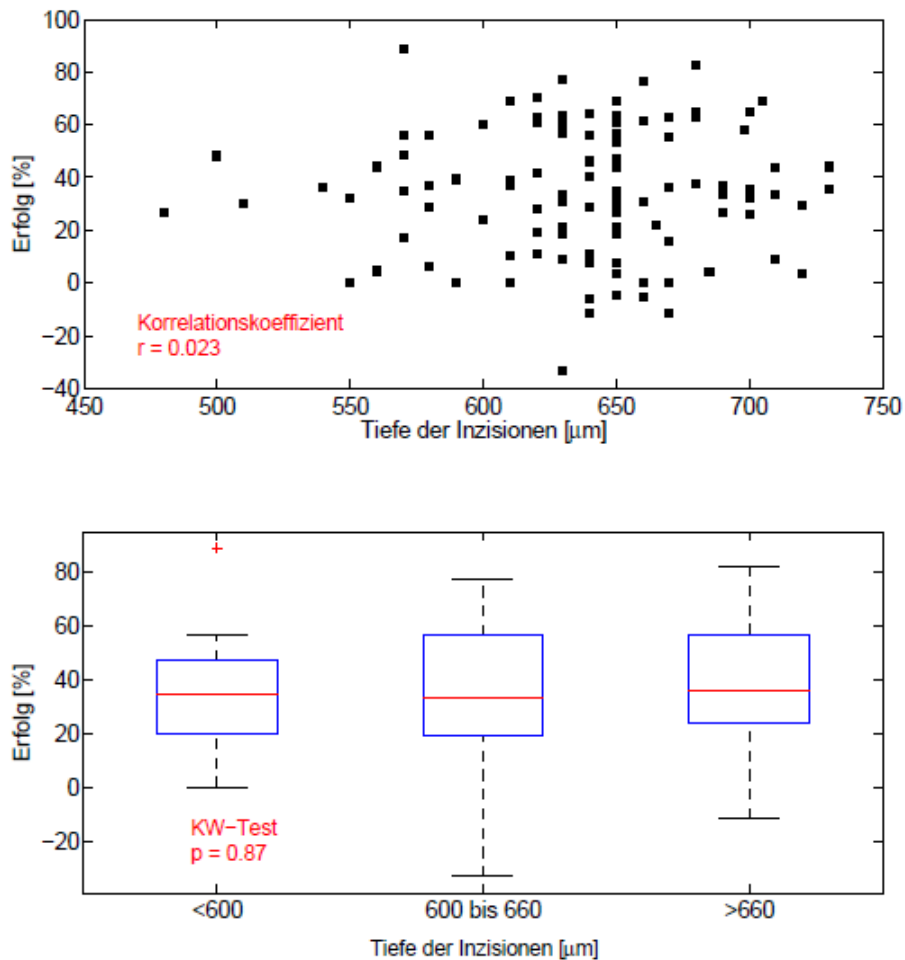
Bezüglich der Achsenlänge der operierten Augen zeigt das nachstehende Diagramm, dass keine Korrelation zwischen der Achsenlänge und dem topographischen Erfolg der Operation besteht (Korrelationskoeffizient  $r = 0,035$ ). Auch nach Subgruppierung der Patienten nach Achsenlänge (< 23 mm, 23 bis 24,5 mm, > 24,5 mm), zeigte sich kein signifikanter Unterschied des topographischen Erfolgs der Operationen zwischen den Subgruppen ( $p = 0,11$ ).



**Abbildung 64:** Die Korrelation zwischen der Achsenlänge der operierten Augen und dem Erfolg der Astigmatismusreduktion, Daten der topographischen Auswertung, Gruppe I

## Tiefe

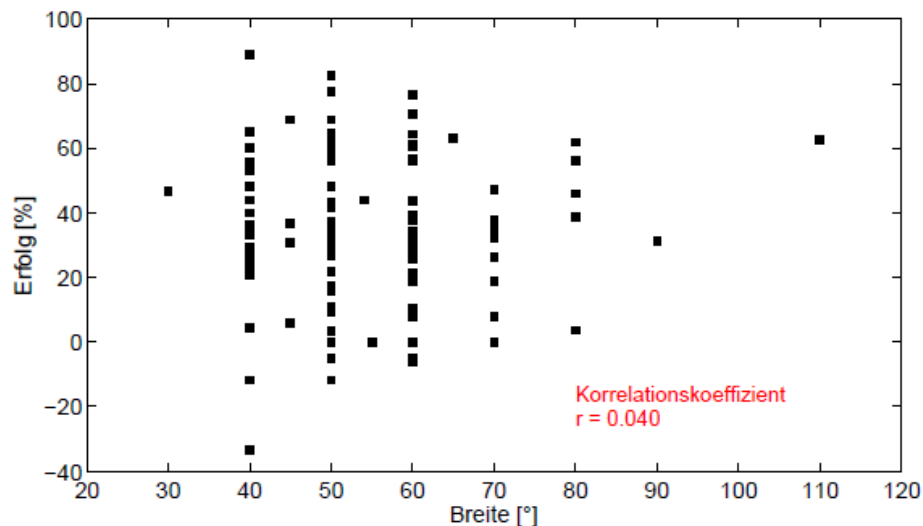
Bei der Planung der PCCRI wurde die Tiefe der Inzisionen fest auf 95 % der Hornhautdicke in der optischen Zone von 8 mm bestimmt. Abhängig von der Dicke der Hornhaut jedes Patienten ergab sich eine unterschiedliche Tiefe der Inzisionen. Das folgende Diagramm zeigt, dass keine Korrelation zwischen der geplanten Tiefe der Inzisionen und dem topographischen Erfolg der Operation besteht (Korrelationskoeffizient  $r = 0,023$ ). Auch nach Subgruppierung der Patienten nach Schnitttiefe ( $< 600 \mu\text{m}$ ,  $600 \mu\text{m}$  bis  $660 \mu\text{m}$ ,  $> 660 \mu\text{m}$ ) zeigte sich kein signifikanter Unterschied des topographischen Erfolgs der Operationen innerhalb der Subgruppen ( $p = 0,87$ ).



**Abbildung 65:** Die Korrelation zwischen der geplanten Tiefe der Inzisionen und dem Erfolg der Astigmatismusreduktion, Daten der topographischen Auswertung, Gruppe I

### Breite

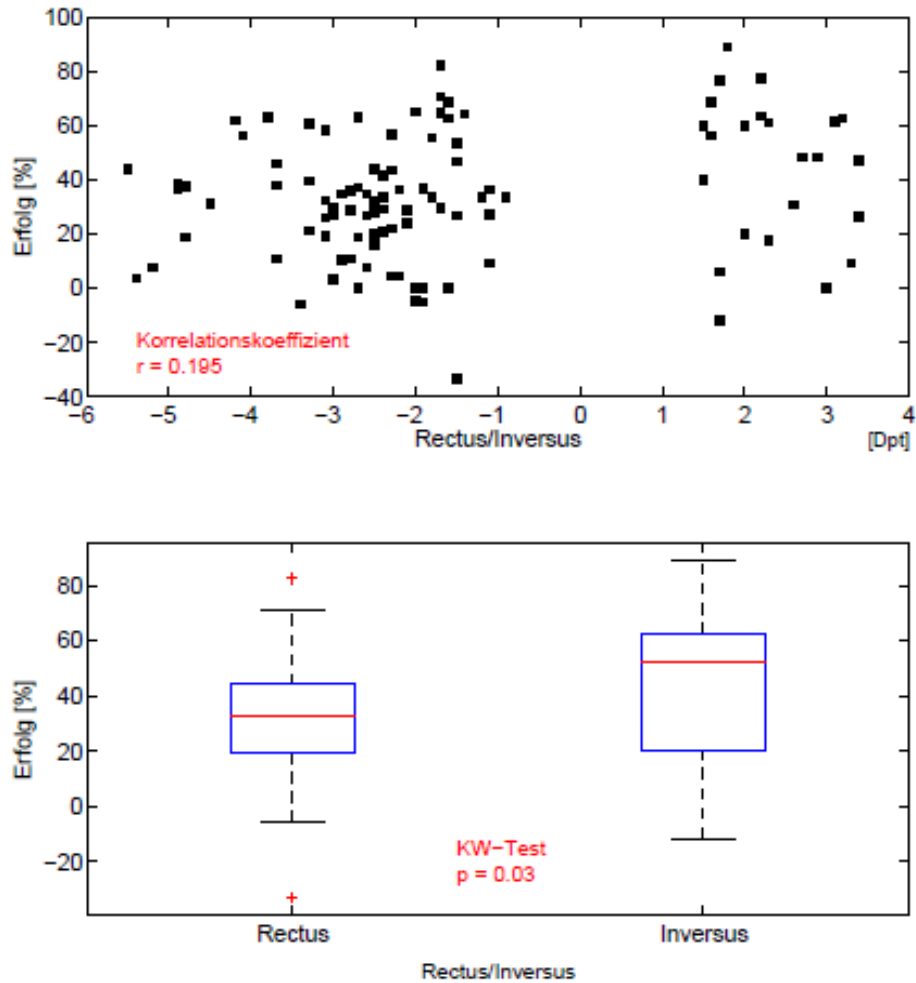
Bezüglich der Breite der PCCRI zeigt das nachstehende Diagramm, dass keine Korrelation zwischen der geplanten Breite der Inzisionen und dem topographischen Erfolg der Operation besteht (Korrelationskoeffizient  $r = 0,040$ ).



**Abbildung 66:** Die Korrelation zwischen der geplanten Breite der Inzisionen und dem Erfolg der Astigmatismusreduktion, Daten der topographischen Auswertung, Gruppe I

### Form des Astigmatismus

Hinsichtlich der Form des Astigmatismus zeigt das folgende Diagramm, dass eine fragliche Korrelation zwischen dem Vorliegen von Astigmatismus rectus oder inversus und dem topographischen Erfolg der Operation besteht (Korrelationskoeffizient  $r = 0,195$ ). Dieser r-Wert kann weder eine starke Korrelation nachweisen noch eine Korrelation ausschließen. Auch nach Subgruppierung der Patienten (Astigmatismus rectus, Astigmatismus inversus) zeigte sich ein kein eindeutiger signifikanter Unterschied des topographischen Erfolgs der Operationen zwischen den Subgruppen ( $p = 0,03$ ).



**Abbildung 67:** Die Korrelation zwischen der Form des präoperativen Astigmatismus und dem Erfolg der Astigmatismusreduktion, Daten der topographischen Auswertung, Gruppe I

Der Verdacht auf eine Tendenz zur höheren Effektivität der PCCRI bei Astigmatismus inversus ist mit den Publikationen von *Wang et al* [138] sowie denen von *Silva et al* [139] vereinbar, wobei über eine höhere Astigmatismusreduktion beim Vorliegen eines Astigmatismus inversus berichtet wurde. Gleiches ist auch in „*Cornea*“ [79] erwähnt. Es konnte jedoch in unserer Studie keine eindeutige statistische Signifikanz nachgewiesen werden. Weitere Studien zum Vergleich des Effektes der Keratotomien auf dem vertikalen und horizontalen Meridian sind erforderlich, um diese Schlussfolgerung zu bestätigen.

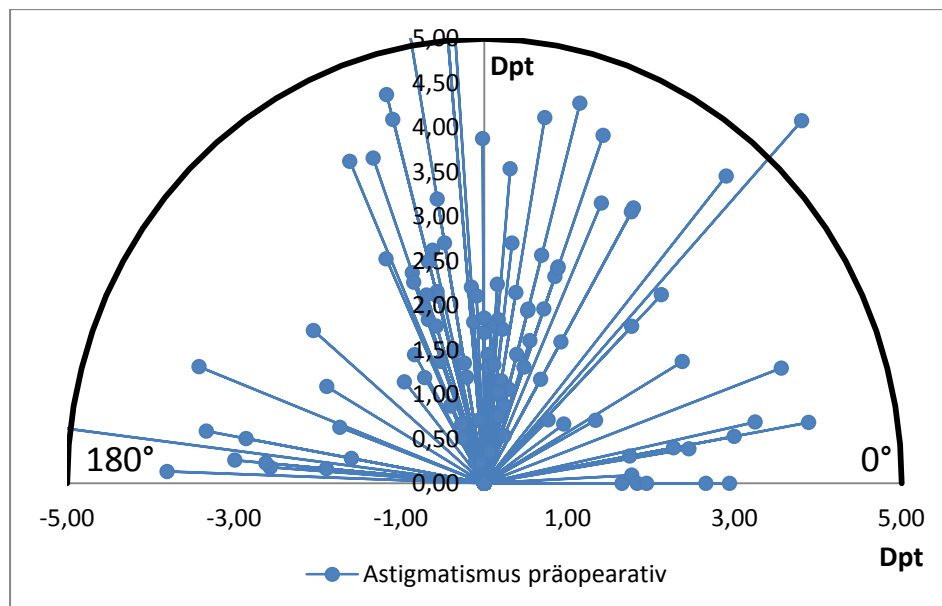
### 3.2.3 Refraktive Auswertung

Die o. g. Ergebnisse sind anhand der topographischen Auswertung der Daten berechnet. Im klinischen Alltag ist allerdings die refraktive Veränderung, welche durch eine astigmatismuskorrigierende Methode erzeugt wurde, von größerer Bedeutung. Die refraktive Auswertung der Daten bietet einen besseren Überblick bezüglich der Effektivität der Methode sowie die Möglichkeit, diese Ergebnisse mit den Ergebnissen anderer Methoden zu vergleichen (z. B. mit der Astigmatismuskorrektur mittels Implantation einer torischen Intraokularlinse).

Die Werte zur refraktiven Auswertung wurden vorerst von Brillenwerten auf Werte auf der Ebene der Hornhautoberfläche umgerechnet, sodass ein direkter Vergleich mit den Ergebnissen der topographischen Auswertung möglich ist.

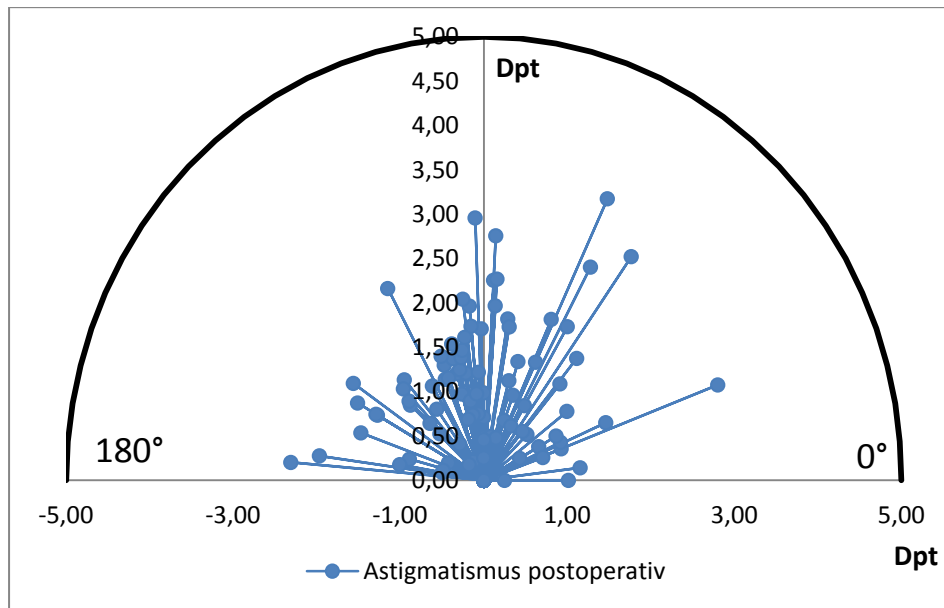
Der arithmetische Mittelwert des präoperativen refraktiven Astigmatismus betrug 2,41 Dpt, SD  $\pm$  1,26 Dpt (Minimum 0,24 Dpt, Maximum 6,4 Dpt).

Der Vektor des präoperativen refraktiven Astigmatismus für jedes Auge ist im folgenden Diagramm dargestellt:



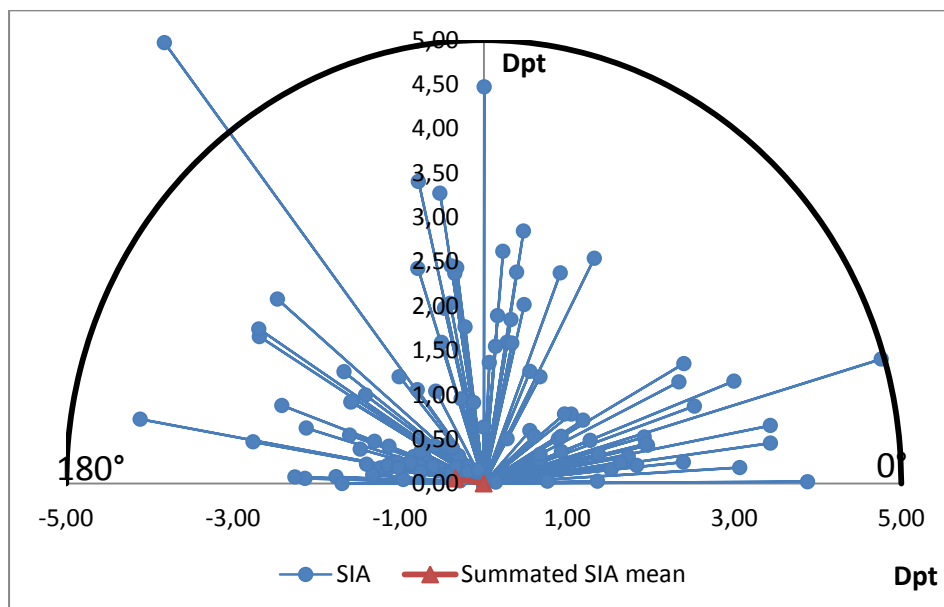
**Abbildung 68:** Die Vektoren des präoperativen refraktiven Astigmatismus, Gruppe I

Der Mittelwert der Größe des postoperativen refraktiven Astigmatismus betrug 1,08 Dpt, SD  $\pm$  0,8 Dpt (Minimum 0 Dpt, Maximum 3,5 Dpt).

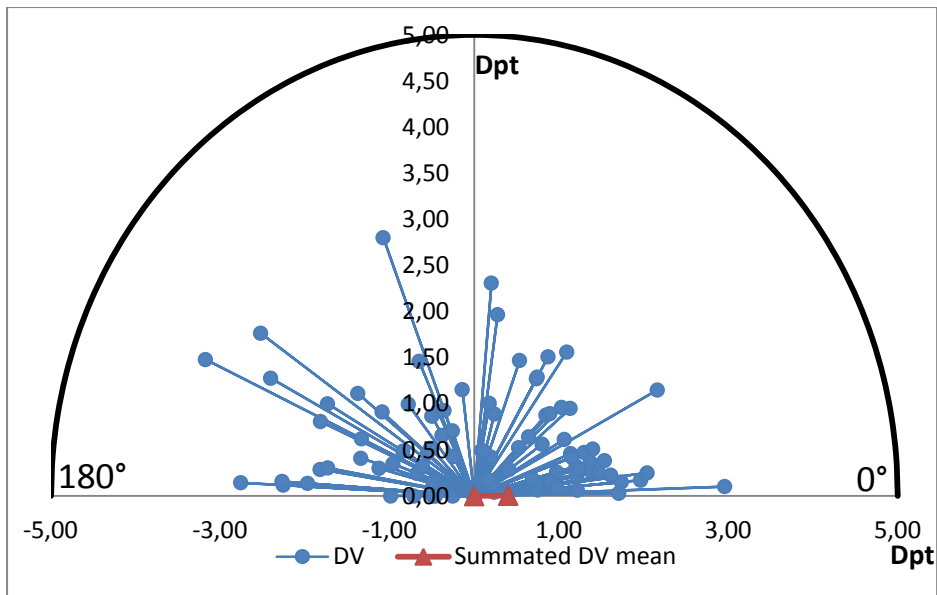


**Abbildung 69:** Die Vektoren des postoperativen refraktiven Astigmatismus, Gruppe I

Es folgen weitere Diagramme, die den refraktiven SIA und DV darstellen:

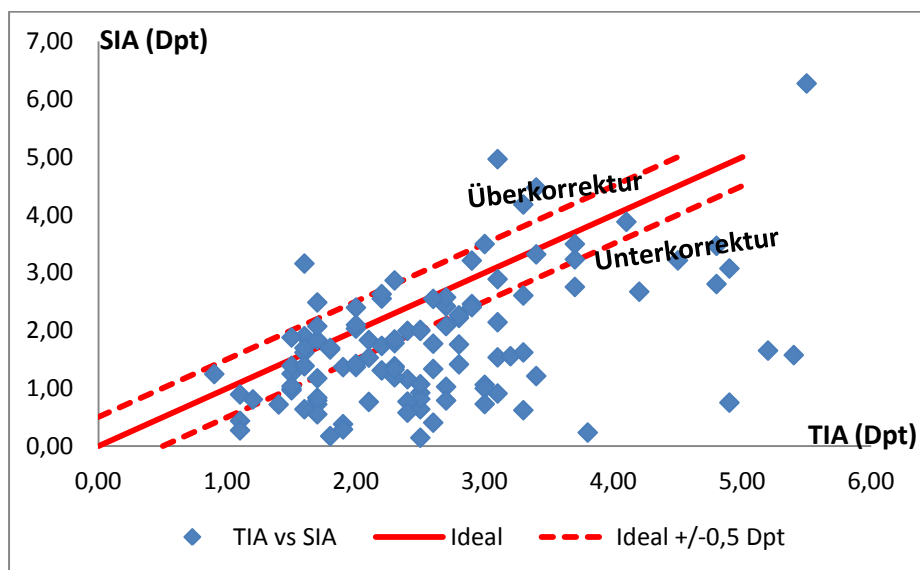


**Abbildung 70:** Die Vektorendarstellung der SIA, refraktiv, Gruppe I  
Vektorendarstellung der erzeugten Astigmatismusveränderung (SIA) auf der präoperativen Achse, sowie des „Summated Vector Mean“ für den SIA (0,23 Dpt/ 6,83°), Daten der refraktiven Auswertung, Gruppe I



**Abbildung 71:** Die Vektorendarstellung des DV, refraktiv, Gruppe I. Vektorendarstellung des Behandlungsfehlers (DV) auf der präoperativen Achse, sowie des „Summated Vector Mean“ für den DV (0,40 Dpt/0,59°), Daten der refraktiven Auswertung, Gruppe I.

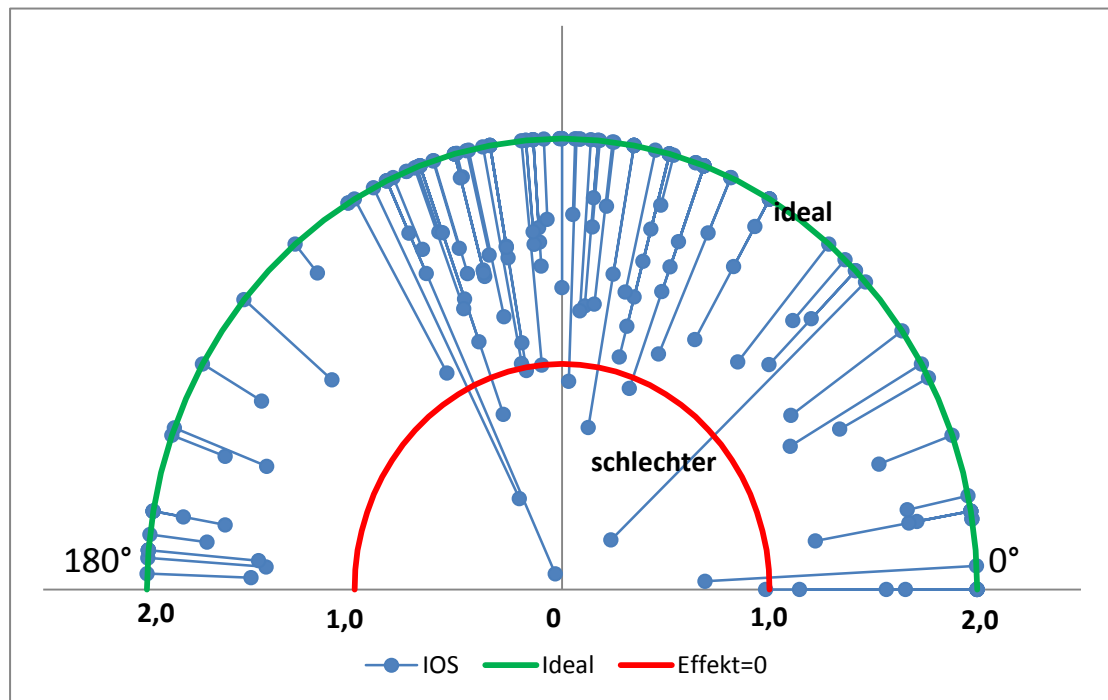
Die Korrelation zwischen refraktivem SIA und TIA (Korrelationskoeffizient  $r = 0,49$ ,  $p = 0,0000000458075911$ ) wird durch das folgende Diagramm dargestellt. Punkte über der durchgezogenen Linie weisen auf eine Überkorrektur hin, während jene unter der durchgezogenen Linie auf eine Unterkorrektur hinweisen. Die gestrichelten Linien stellen den Bereich von  $\pm 0,5$  Dpt dar. Es liegt eine statistisch stark signifikante Korrelation zwischen SIA und TIA vor.



**Abbildung 72:** Streudiagramm der SIA vs. TIA, Daten der refraktiven Auswertung, Gruppe I.



Der Ausdruck des entsprechenden refraktiven IOS-Wertes auf der steilen Achse des präoperativen Astigmatismus ist durch folgendes Diagramm dargestellt:

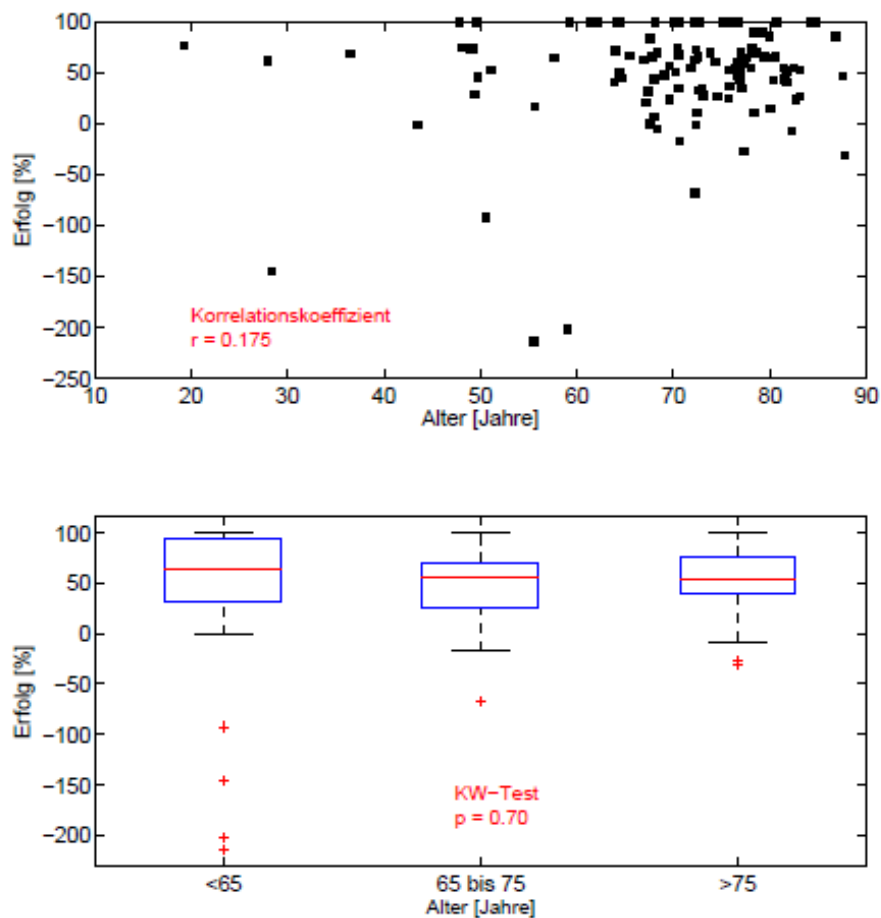


**Abbildung 73:** Der IOS auf der Achse der geplanten Korrektur, Daten der refraktiven Auswertung, Gruppe I

Entsprechend der topographischen Auswertung der PCCRI im Verhältnis zum Alter, der Achsenlänge, der geplanten Tiefe und Breite der Inzisionen sowie der Form des Astigmatismus wurden hier ebenfalls die o. g. Faktoren mit den refraktiven Daten ausgewertet.

Alter

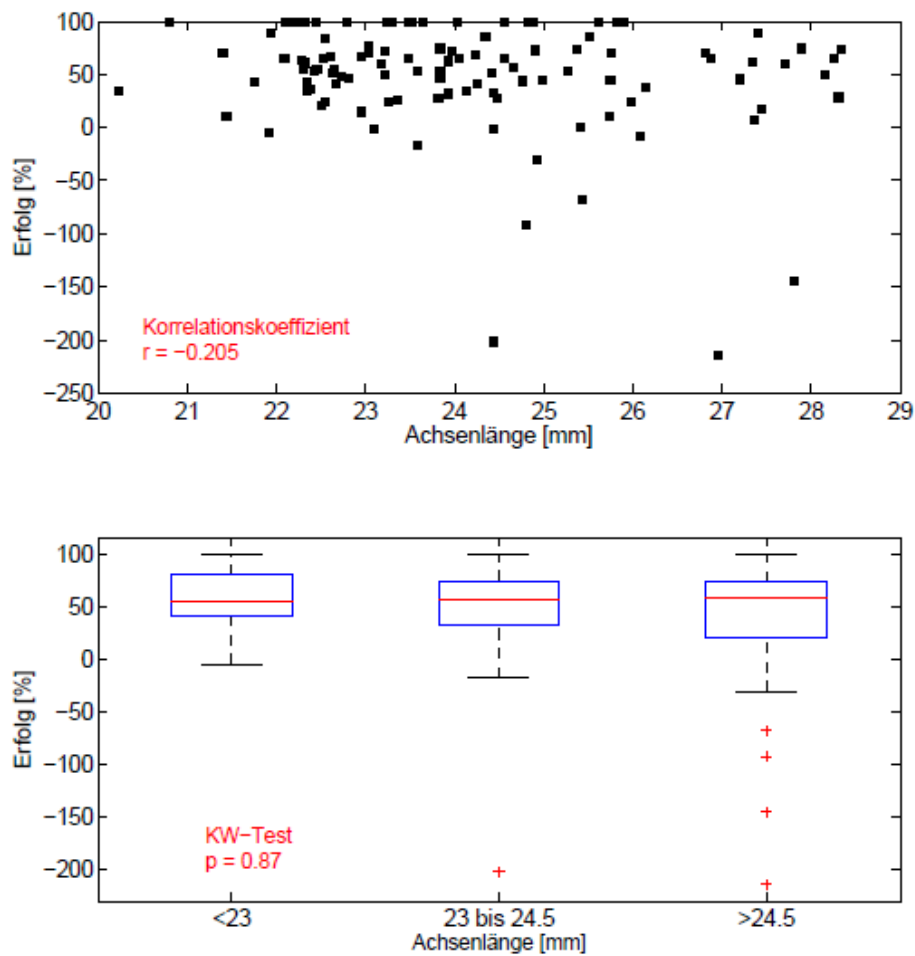
Bezüglich des Alters der Patienten zeigt das nachstehende Diagramm, dass keine Korrelation zwischen dem Alter am Tag der Operation und dem refraktiven Erfolg der Operation besteht (Korrelationskoeffizient  $r = 0,175$ ). Auch nach Subgruppierung der Patienten in Alterssubgruppen (< 65, 65 bis 75, > 75 Jahre) zeigte sich kein signifikanter Unterschied des refraktiven Erfolgs der Operationen zwischen den Subgruppen ( $p = 0,70$ ).



**Abbildung 74:** Korrelation zwischen dem Alter der Patienten am Tag der Operation und dem Erfolg der Astigmatismusreduktion, Daten der refraktiven Auswertung, Gruppe I

### Achsenlänge

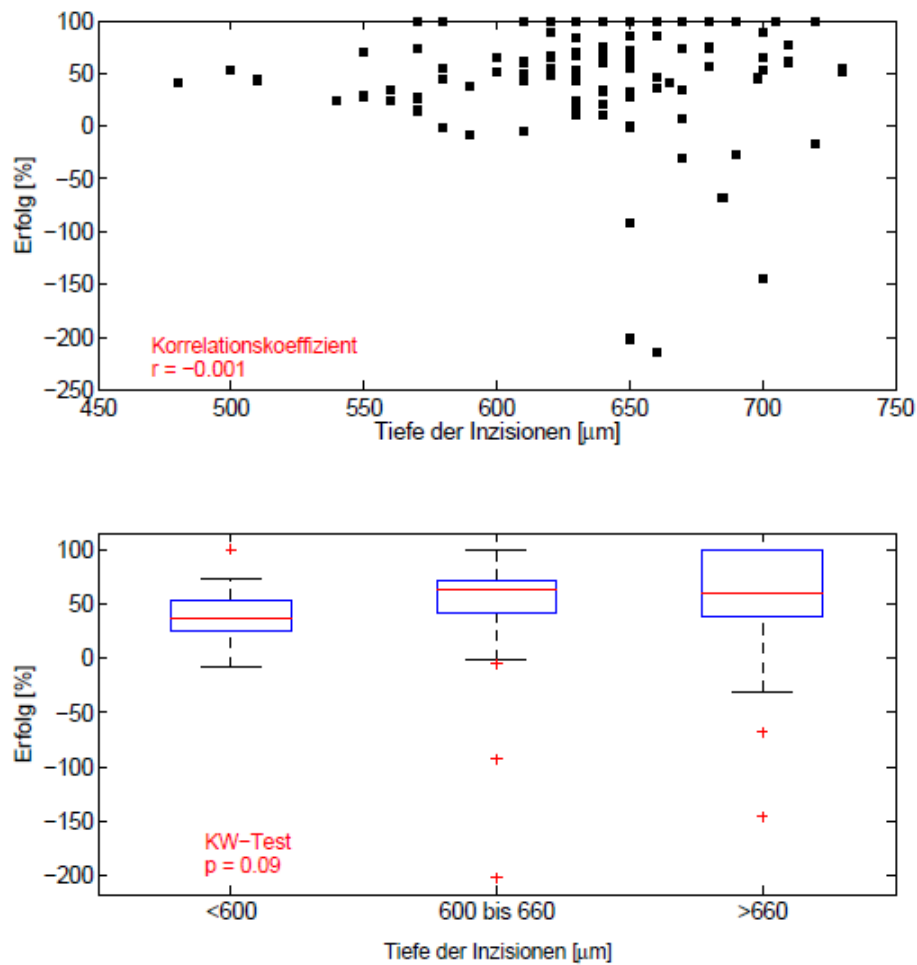
Bezüglich der Achsenlänge der operierten Augen zeigt das folgende Diagramm, dass keine Korrelation zwischen der Achsenlänge und dem refraktiven Erfolg der Operation besteht (Korrelationskoeffizient  $r = -0,205$ ). Auch nach Subgruppierung der Patienten (< 23 mm, 23 bis 24,5 mm, > 24,5 mm) zeigte sich kein signifikanter Unterschied des refraktiven Erfolgs der Operationen zwischen den Subgruppen ( $p = 0,87$ ).



**Abbildung 75:** Korrelation zwischen der Achsenlänge der operierten Augen und dem Erfolg der Astigmatismusreduktion, Daten der refraktiven Auswertung, Gruppe

## Tiefe

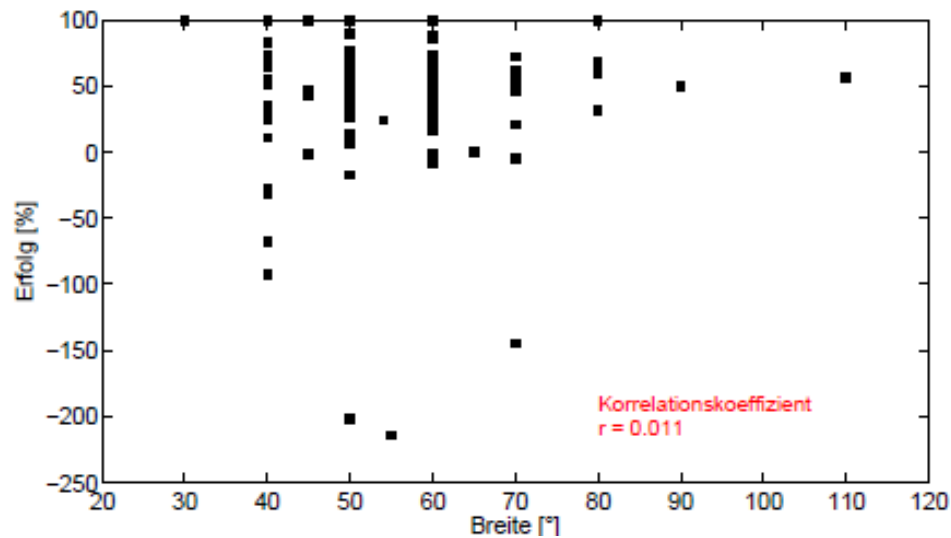
Bezüglich der Tiefe der PCCRI zeigt das folgende Diagramm, dass keine Korrelation zwischen der geplanten Tiefe der Inzisionen und dem refraktiven Erfolg der Operation besteht (Korrelationskoeffizient  $r = -0,001$ ). Auch nach Subgruppierung der Patienten ( $< 600 \mu\text{m}$ ,  $600 \mu\text{m}$  bis  $660 \mu\text{m}$ ,  $> 660 \mu\text{m}$ ) zeigte sich kein signifikanter Unterschied des refraktiven Erfolgs der Operationen innerhalb der Subgruppen ( $p = 0,09$ ).



**Abbildung 76:** Korrelation zwischen der geplanten Tiefe der Inzisionen und dem Erfolg der Astigmatismusreduktion, Daten der refraktiven Auswertung, Gruppe I

### Breite

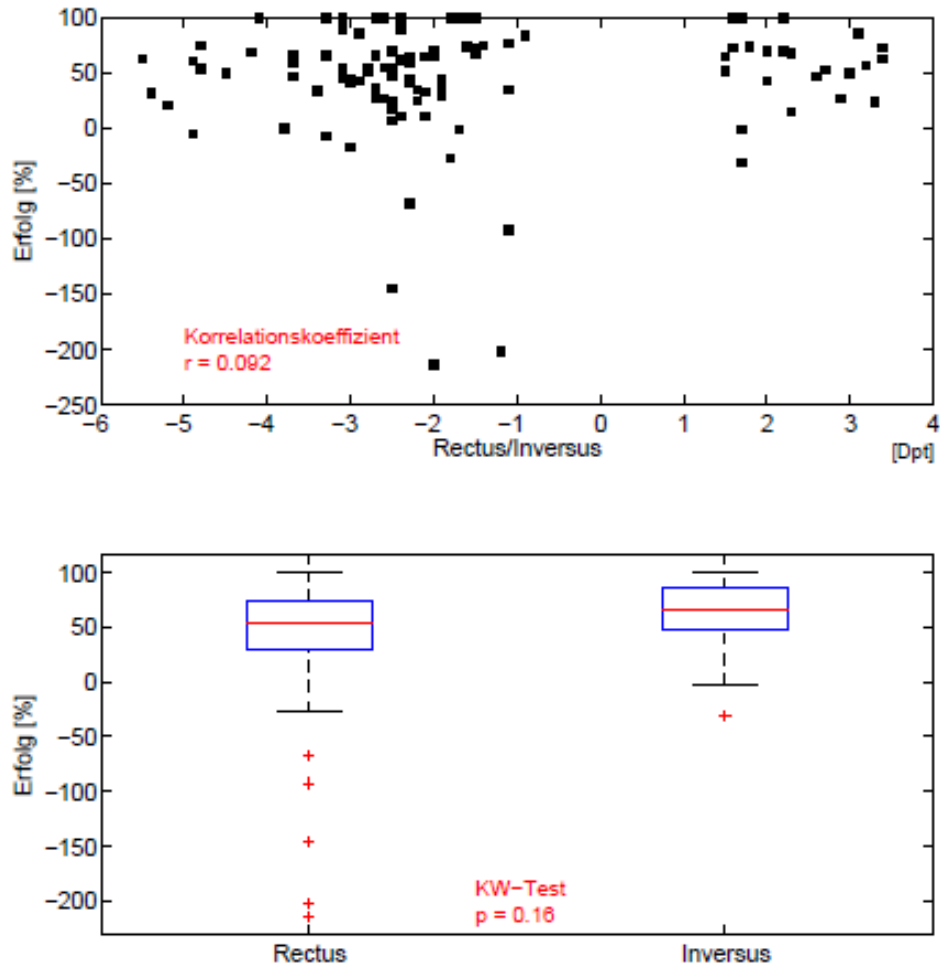
Bezüglich der Breite der PCCRI zeigt das folgende Diagramm, dass keine Korrelation zwischen der geplanten Breite der Inzisionen und dem refraktiven Erfolg der Operation besteht (Korrelationskoeffizient  $r = 0,011$ ).



**Abbildung 77:** Korrelation zwischen der geplanten Breite der Inzisionen und dem Erfolg der Astigmatismusreduktion, Daten der refraktiven Auswertung, Gruppe I

### Form des Astigmatismus

Bezüglich der Form des präoperativen Astigmatismus zeigt das nachstehende Diagramm, dass keine Korrelation zwischen dem Vorliegen von einem Astigmatismus rectus oder inversus und dem refraktiven Erfolg der Operation besteht (Korrelationskoeffizient  $r = 0,092$ ). Auch nach Subgruppierung der Patienten (Astigmatismus rectus, Astigmatismus inversus), zeigte sich kein signifikanter Unterschied des refraktiven Erfolgs der Operationen zwischen den Subgruppen ( $p = 0,16$ ).



**Abbildung 78:** Korrelation zwischen der Form des präoperativen Astigmatismus und dem Erfolg der Astigmatismusreduktion, Daten der refraktiven Auswertung, Gruppe I

Die auf die refraktiven Daten gestützte statistische Auswertung bestätigt die Vermutung nicht, die durch die statistische Auswertung der topographischen Daten entstanden ist, dass also PCCRI effektiver bei der Korrektur eines Astigmatismus inversus seien. Weitere Studien könnten zu dieser These mehr Aufschluss bieten.

Der arithmetische Mittelwert des refraktiven „Erfolges der Astigmatismusreduktion“ für alle Operationen liegt bei 47,13 %. Wenn es postoperativ zu einer Abnahme der Größe des bestehenden refraktiven Astigmatismus kommt (97 Augen), wird der refraktive Astigmatismus im Mittelwert um 61,2 % reduziert. Wenn die postoperative Größe des refraktiven Astigmatismus höher als präoperativ ist (12 Augen), kommt es zu einer Zunahme der Größe des refraktiven Astigmatismus im Mittelwert um 67,76 %. Bei einem Auge zeigte sich keine Änderung der subjektiv angenommenen Astigmatismuskorrektur.

Die Ergebnisse der Durchführung der PCCRI zur Astigmatismusreduktion in unserer Klinik sind mit bisher veröffentlichten Ergebnissen vereinbar. *Bradley et al* [140] berichten von einer operativen Astigmatismusreduktion von ca. 60 % durch Keratotomien, *Arraes et al* [141] von einer Reduktion des refraktiven präoperativen Astigmatismus um 65 %. *Gegge* [142] berichtet, dass 81 % der Patienten eine Reduktion des präoperativen Astigmatismus von mindestens 50 % zeigten.

Insgesamt ähnliche Ergebnisse mit unserer Auswertung zeigt auch die Publikation von *Kim et al* [143]:

Auswertungsparameter	St. Vincentius Augenklinik der Vincentius-Diakonissen-Kliniken gAG, Karlsruhe, Deutschland	<i>Kim et al</i> , Seoul Korea [143]
Schnitttiefe ( $\mu\text{m}$ )	637 $\pm$ 47,5	620 $\pm$ 31
Schnittbreite ( $^{\circ}$ )	54,40 $\pm$ 12,59	56,84 $\pm$ 19,68
Astigmatismusreduktion topographisch (%)	34,36	32,4
Astigmatismusreduktion refraktiv (%)	47,13	49,4

**Tabelle 2:** Ergebnisse nach Durchführung von PCCRI  
Vergleich der Ergebnisse nach Durchführung von PCCRI, St. Vincentius Augenklinik der Vincentius-Diakonissen-Kliniken gAG, Karlsruhe, Deutschland und *Kim et al*, Korea [143]

Der mittlere refraktive präoperative Astigmatismus bei den Augen der Gruppe I lag bei  $2,41 \pm 1,26$  Dpt, der mittlere postoperative bei  $1,08 \pm 0,8$  Dpt. Es kam zu einer Reduktion der Größe des bestehenden refraktiven Astigmatismus um  $-1,33 \pm 1,08$  Dpt.

Ähnliche Ergebnisse veröffentlichten *Bayramlar et al* [144], wobei die mittlere Reduktion des refraktiven Astigmatismus  $1,72 \pm 0,81$  Dpt betrug.

Die Ergebnisse der Auswertung der Gruppe I bezüglich der Effektivität der Methode sind kumulativ in folgender Tabelle dargestellt:

	Topographisch		Refraktiv	
Mittelwerte	Präoperativ	Postoperativ	Präoperativ	Postoperativ
Astigmatismus (Dpt) $\pm$ SD (Dpt)	$2,56 \pm 0,4$	$1,7 \pm 0,91$	$2,41 \pm 1,26$	$1,08 \pm 0,8$
Astigmatismus-Reduktion (Dpt)	$0,86 \pm 0,63$		$1,33 \pm 1,08$	
TIA (Dpt)	$2,56 \pm 0,97$			
SIA (Dpt)	$1,21 \pm 0,83$		$1,76 \pm 1,07$	
DV (Dpt)	$1,70 \pm 0,91$		$1,07 \pm 0,81$	
IOS (geometrischer Mittelwert)	$0,63$		$0,39$	

**Tabelle 3:** Die PCCRI-Ergebnisse der Augenklinik der St. Vincentius Augenklinik der Vincentius-Diakonissen-Kliniken gAG, Karlsruhe  
Ergebnisse nach Durchführung von PCCRI, topographische und refraktive Auswertung

Aus den o. g. Daten ist zu entnehmen, dass die Ergebnisse der durchgeführten astigmatismusreduzierenden Hornhautinzisionen auf refraktiver Ebene günstiger sind als auf topographischer Ebene. Die Feststellung deckt sich mit der Zusammenfassung von *Alpins* [145] sowie den Schlussfolgerungen von *Kim et al* [143] und *Arraes et al* [141].



### 3.3 Gruppe II: Torische Intraokularlinsen

In der Gruppe II wurden sämtliche statistische Auswertungen der Ergebnisse nach Phakoemulsifikation und Implantation einer torischen Intraokularlinse nach dem gleichen Prinzip der statistischen Auswertung der PCCRI durchgeführt, sodass anschließend ein direkter Vergleich der refraktiven Ergebnisse beider Methoden möglich war.

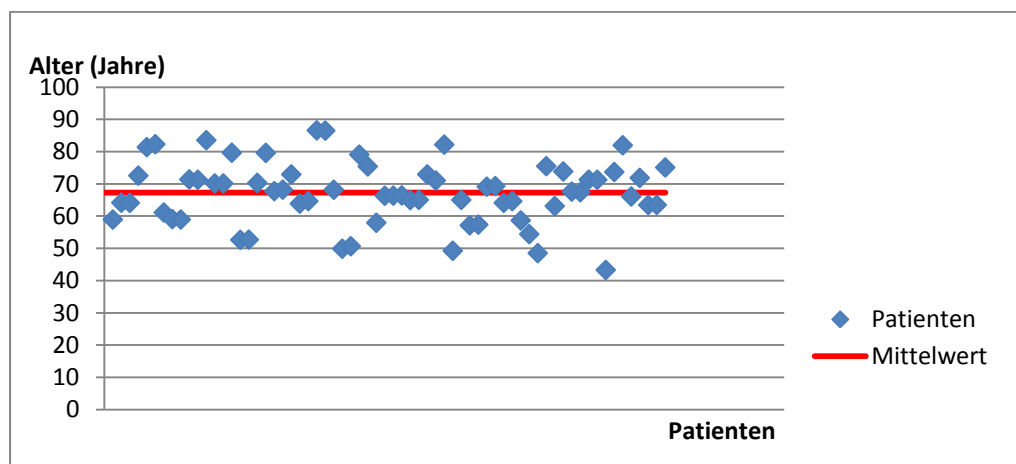
Die Beurteilung der postoperativen Achse der torischen Implantate wurde mithilfe der Spaltlampenuntersuchung nach medikamentöser Mydriasis durchgeführt [vgl. ausführlicher in Kapitel „Material und Methoden“, S. 63].

#### 3.3.1 Biometrische Auswertung

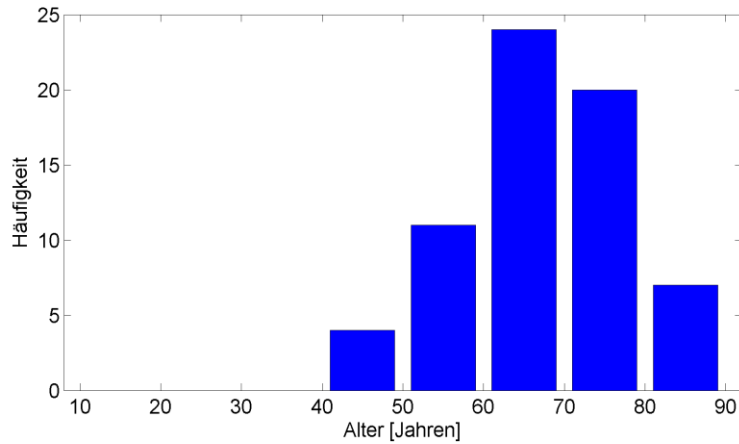
Die biometrische Auswertung der Gruppe II wird in den nachstehenden Diagrammen dargestellt:

##### Alter

Das mittlere Alter der Patienten der Gruppe II betrug 67,26 Jahre. Der jüngste Patient war 43,32 Jahre und der älteste 86,63 Jahre alt.



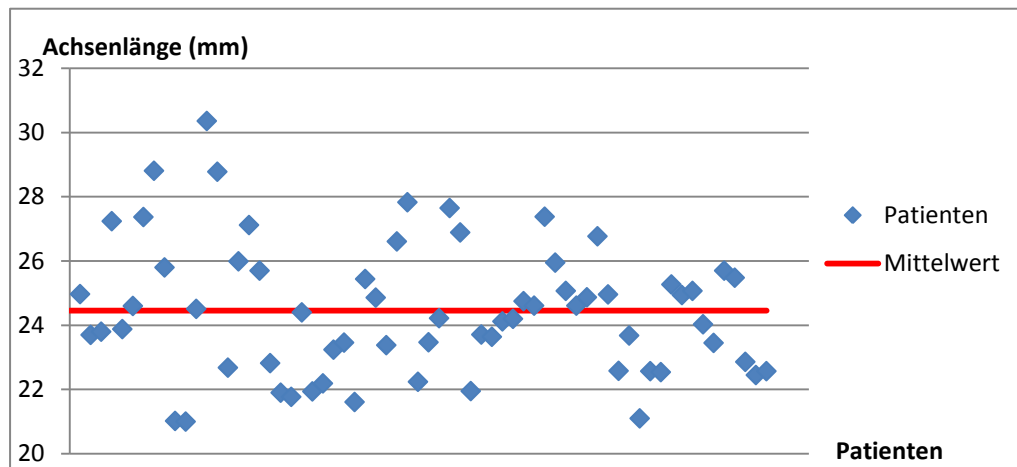
**Abbildung 79:** Die Verteilung des Alters am Tag der Operation, Gruppe II



**Abbildung 80:** Die Häufigkeit des Alters am Tag der Operation, Gruppe II

### Achsenlänge

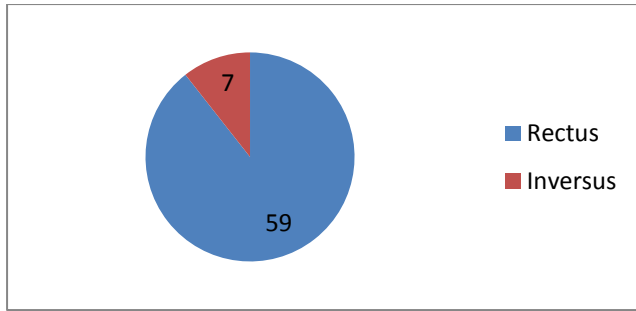
Der Mittelwert der Achsenlänge der operierten Augen betrug 24,46 mm (Minimum 20,02 mm, Maximum 30,36 mm).



**Abbildung 81:** Die Verteilung der Achsenlänge, Gruppe II

### Form des Astigmatismus

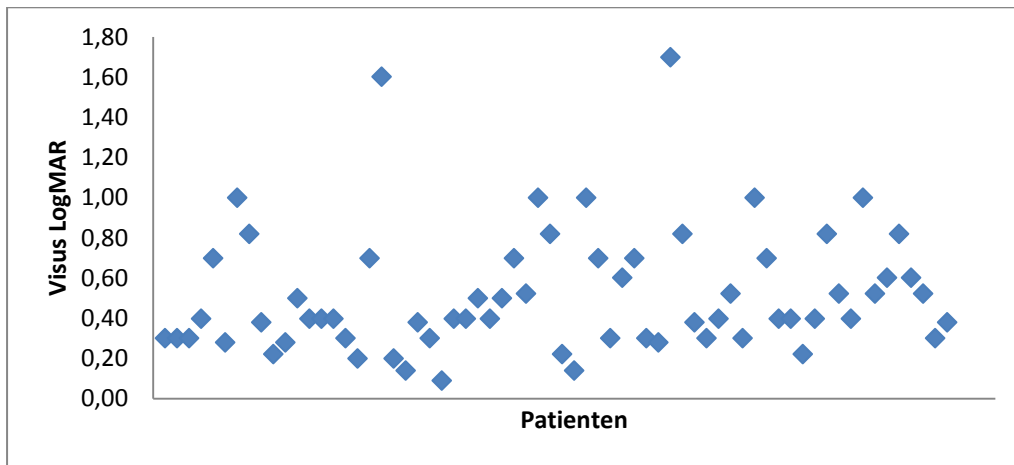
59 Augen (89 %) zeigten präoperativ einen Astigmatismus rectus.  
 7 Augen (11 %) zeigten präoperativ einen Astigmatismus inversus.



**Abbildung 82:** Die Verteilung der Form des präoperativen topographischen Astigmatismus, Gruppe II

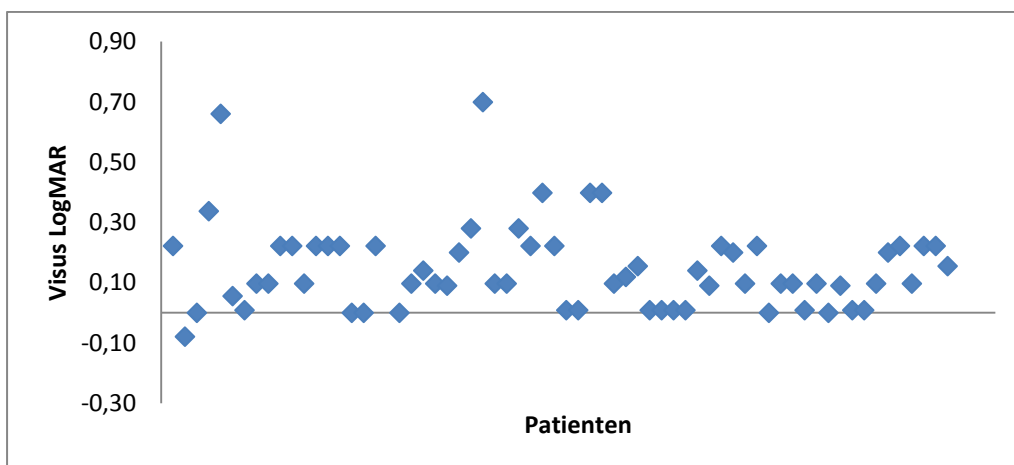
Visus

Der mittlere bestkorrigierte LogMAR Visus betrug präoperativ 0,52.



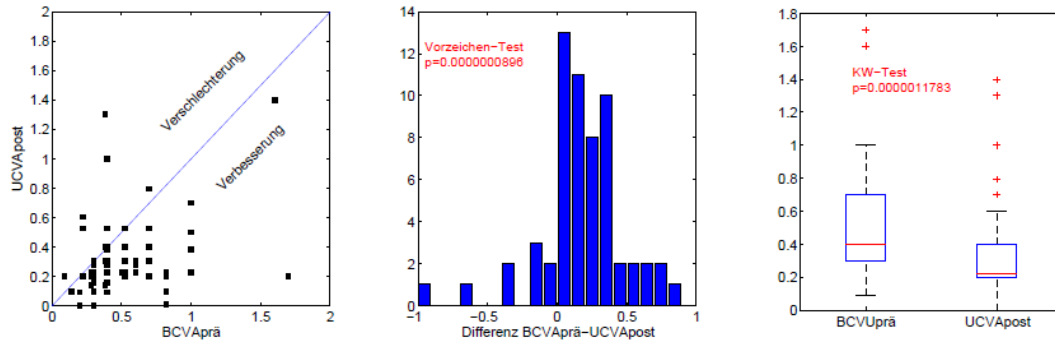
**Abbildung 83:** Der bestkorrigierte präoperative LogMAR Visus (BCVAprä), Gruppe II

Der mittlere bestkorrigierte LogMAR Visus betrug postoperativ 0,16.



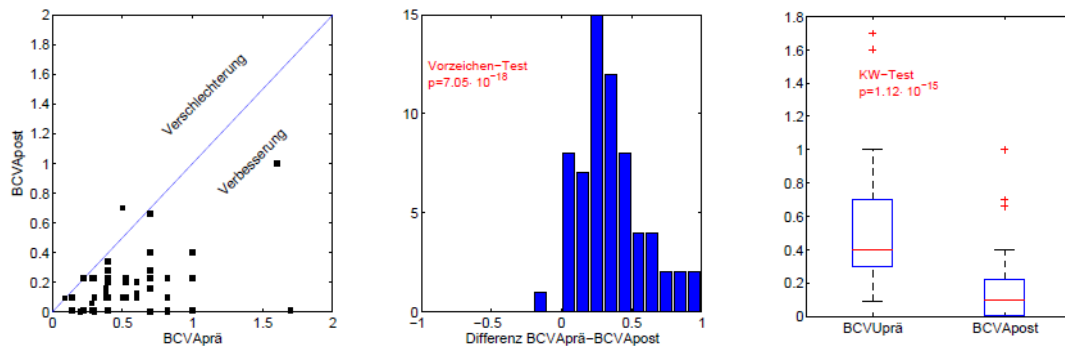
**Abbildung 84:** Der bestkorrigierte postoperative LogMAR Visus (BCVApst), Gruppe II

Der Vergleich zwischen der bestkorrigierten Sehschärfe präoperativ (BCVApre) und der unkorrigierten Sehschärfe postoperativ (UCVApost) zeigt eine statistisch signifikante Verbesserung der Sehschärfe (Vorzeichentest  $p = 0,0000000896$ , KW-Test  $p = 0,0000011783$ ).



**Abbildung 85:** Statistischer Vergleich zwischen BCVA präoperativ und UCVA postoperativ, Gruppe II

Die Verbesserung der Sehschärfe postoperativ ist statistisch noch signifikanter beim Vergleich der bestkorrigierten Sehschärfe präoperativ (BCVApre) und der bestkorrigierten Sehschärfe postoperativ (BCVApost) (Vorzeichentest  $p = 7,05 \cdot 10^{-18}$ , KW-Test  $p = 1,10 \cdot 10^{-15}$ ).

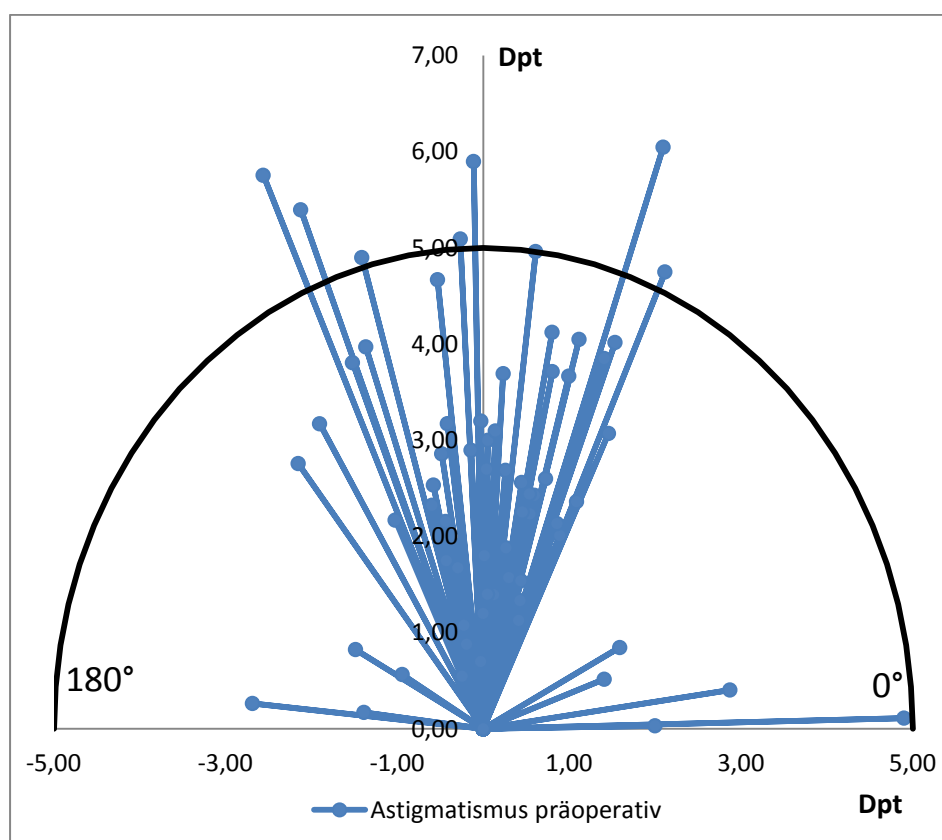


**Abbildung 86:** Statistischer Vergleich zwischen BCVA präoperativ und BCVA postoperativ, Gruppe II

### 3.3.2 Refraktive Auswertung

Zur refraktiven Auswertung wurden die Brillenwerte in die äquivalenten Korrekturwerte auf der Hornhautoberfläche umgerechnet, sodass ein direkter Vergleich mit den Ergebnissen der refraktiven Auswertung der PCCRI möglich war.

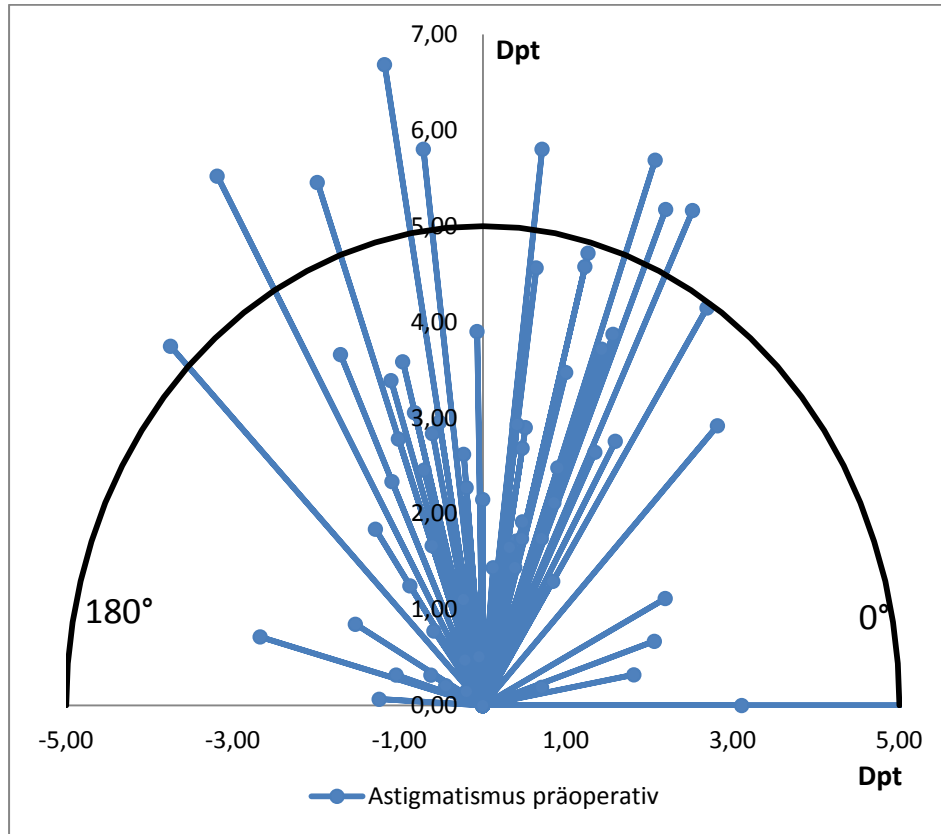
Der arithmetische Mittelwert des präoperativen topographischen Astigmatismus war 2,91 Dpt, SD  $\pm$  1,42 Dpt (Minimum 0,6 Dpt, Maximum 6,79 Dpt).



**Abbildung 87:** Die Vektoren des präoperativen topographischen Astigmatismus, Gruppe II

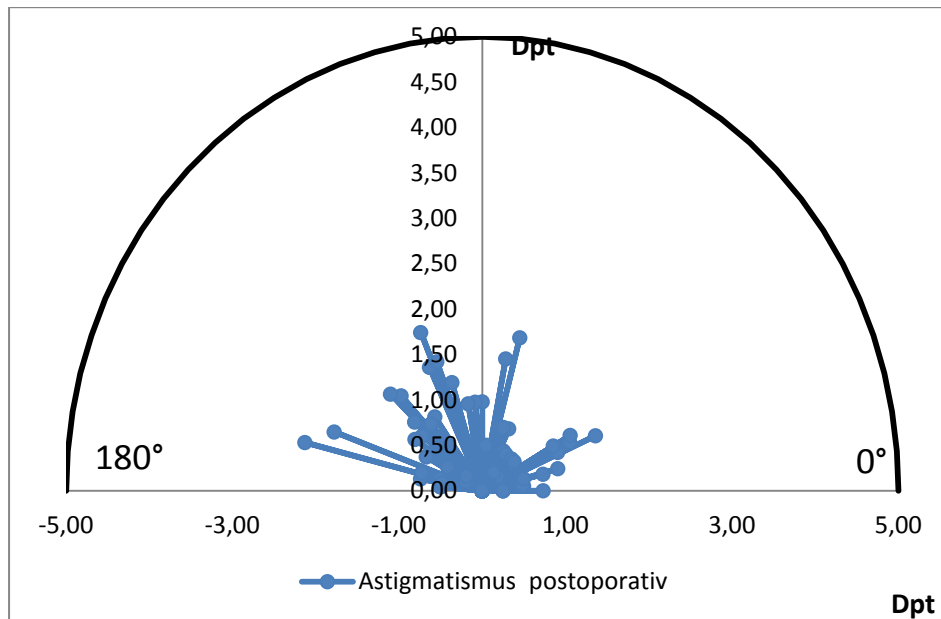
Der arithmetische Mittelwert des präoperativen refraktiven Astigmatismus betrug 2,96 Dpt, SD  $\pm$  1,65 Dpt (Minimum 0,24 Dpt, Maximum 6,79 Dpt).

Der Vektor des präoperativen refraktiven Astigmatismus für jedes Auge ist in folgendem Diagramm dargestellt:



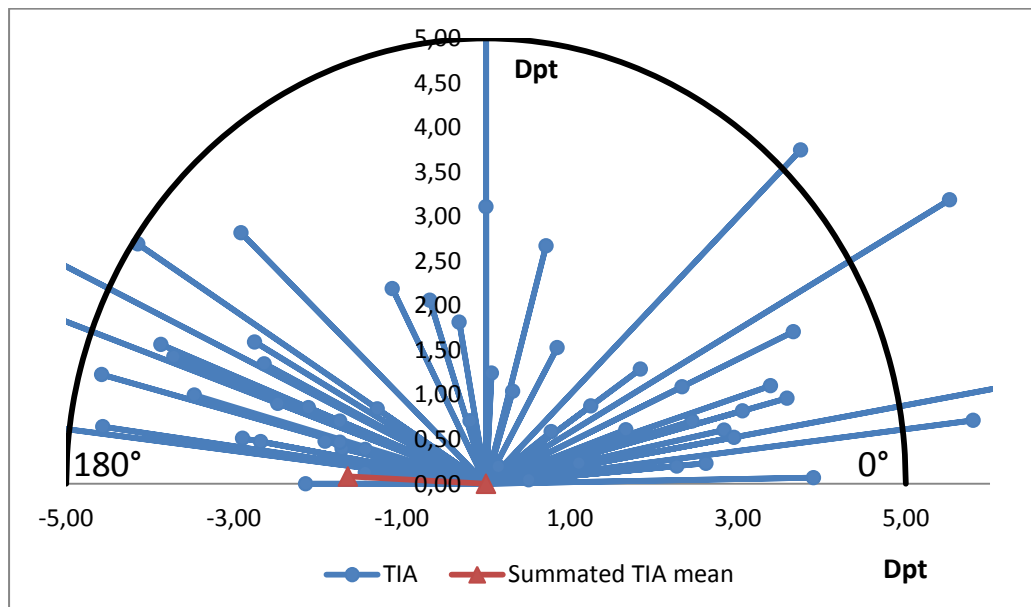
**Abbildung 88:** Die Vektoren des präoperativen refraktiven Astigmatismus, Gruppe II

Der Mittelwert der Größen des postoperativen refraktiven Astigmatismus lag bei 0,70 Dpt, SD  $\pm$  0,55 Dpt (Minimum 0 Dpt, Maximum 2,26 Dpt).

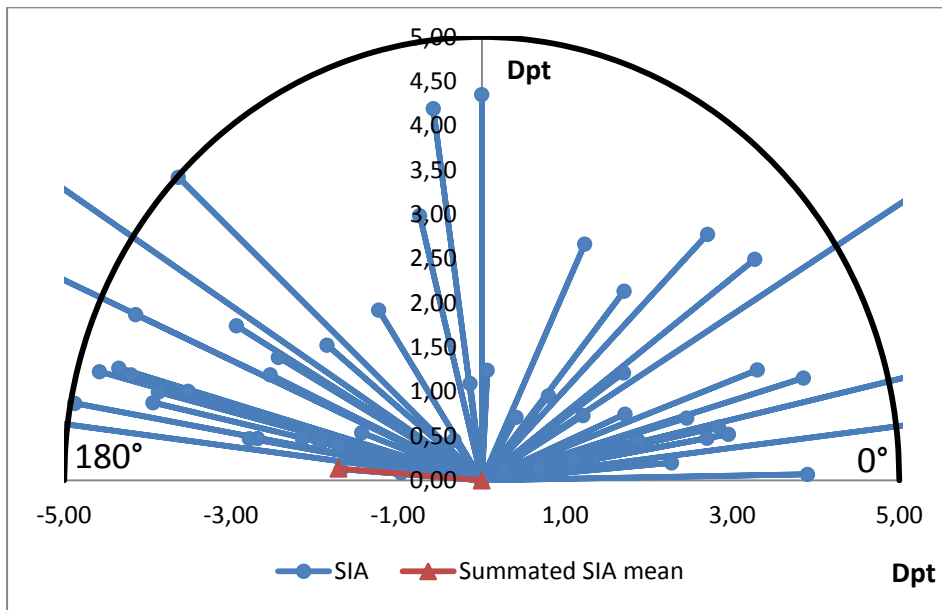


**Abbildung 89:** Die Vektoren des postoperativen refraktiven Astigmatismus, Gruppe II

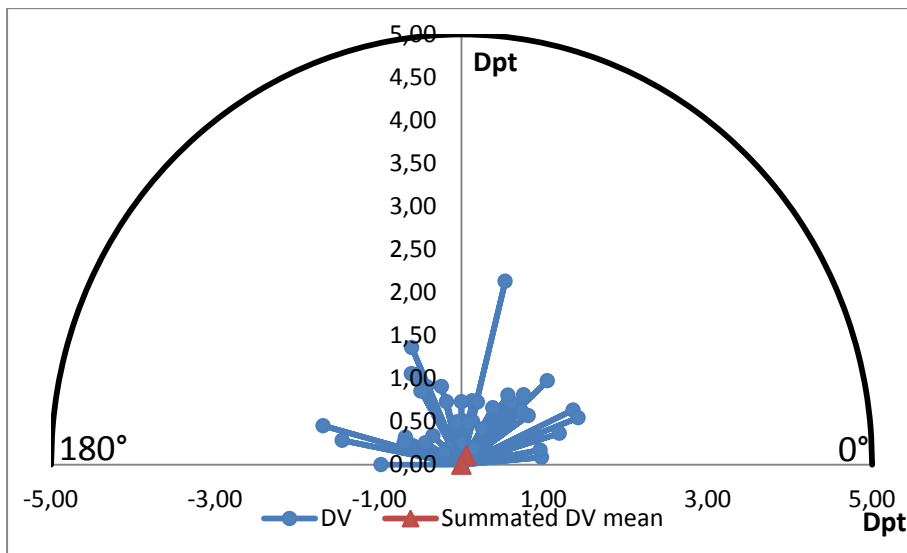
Es folgen weitere Diagramme, welche die TIA, SIA und DV darstellen:



**Abbildung 90:** Die Vektorendarstellung der TIA, refraktiv, Gruppe II  
Vektorendarstellung der gezielten Astigmatismuserzeugung (TIA) auf der präoperativen Achse sowie des „Summated Vector Mean“ für den TIA (1,65 Dpt/ 177,18°), Daten der refraktiven Auswertung, Gruppe II



**Abbildung 91:** Die Vektorendarstellung der SIA, refraktiv, Gruppe II  
 Vektorendarstellung der erzeugten Astigmatismusveränderung (SIA) auf der präoperativen Achse sowie des „Summated Vector Mean“ für dem SIA (1,72 Dpt/ 175,54°), Daten der refraktiven Auswertung, Gruppe II

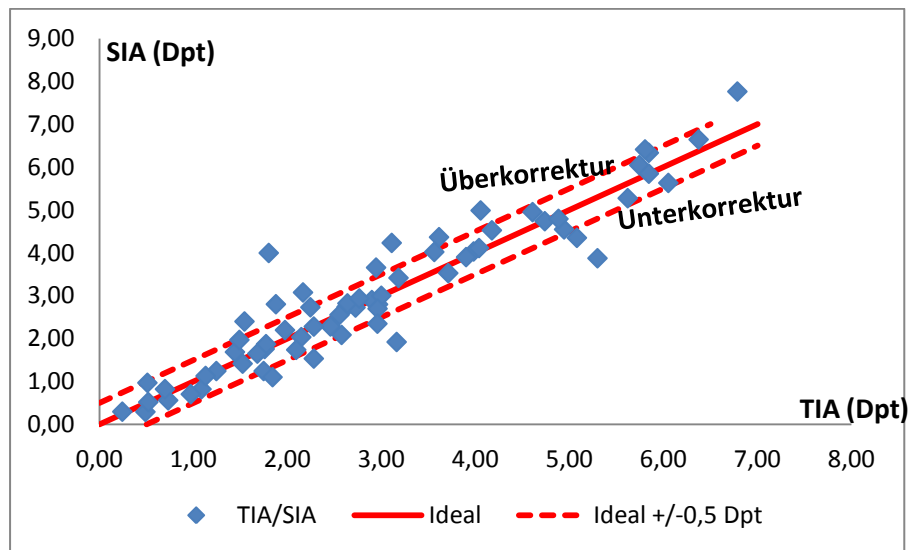


**Abbildung 92:** Die Vektorendarstellung des DV, refraktiv, Gruppe II  
 Vektorendarstellung des Behandlungsfehlers (DV) auf der präoperativen Achse sowie des „Summated Vector Mean“ für den DV (0,12 Dpt/ 60,08°), Daten der refraktiven Auswertung, Gruppe II



Die Korrelation zwischen SIA und TIA (Korrelationskoeffizient  $r = 0,9474$ ,  $p < 0,000001$ ) wird durch das sogleich folgende Diagramm dargestellt. Punkte über der durchgezogenen Linie weisen auf einer Überkorrektur hin, während jene unter der durchgezogenen Linie auf eine Unterkorrektur hindeuten. Die gestrichelten Linien zeigen den Bereich von  $\pm 0,5$  Dpt.

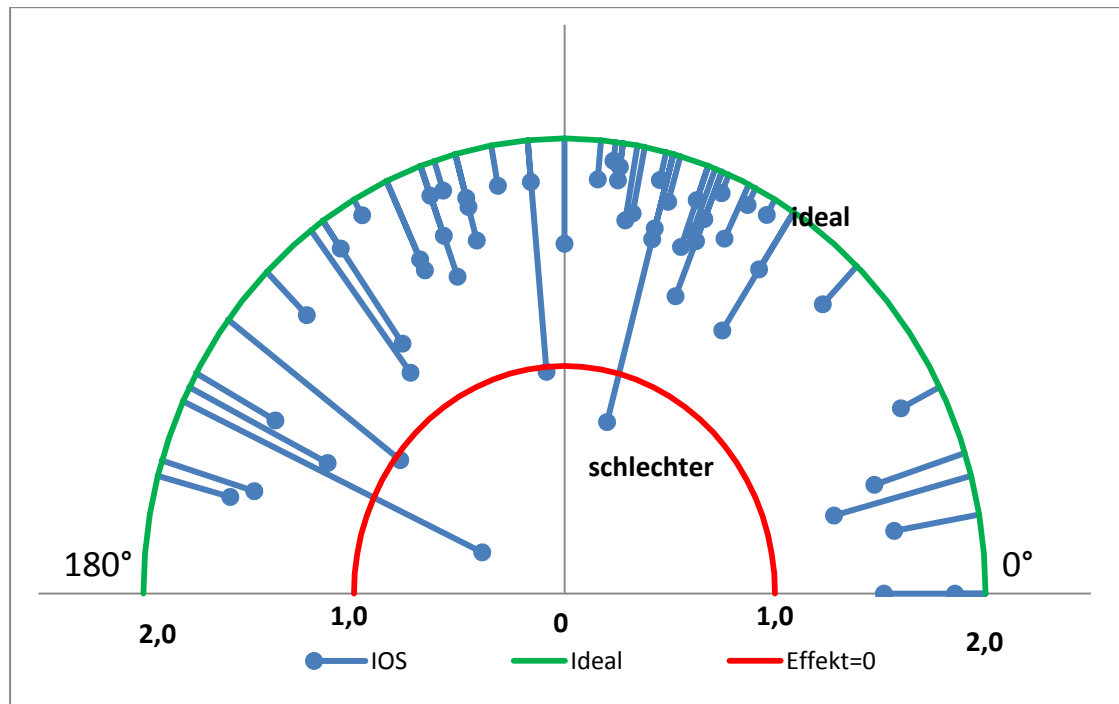
Es liegt eine statistisch stark signifikante Korrelation zwischen SIA und TIA vor.



**Abbildung 93:** Streudiagramm des SIA vs. TIA. Daten der refraktiven Auswertung, Gruppe II

Es liegt eine deutliche Tendenz dahingehend vor, dass Ergebnisse im Optimalbereich, d. h.  $SIA = TIA$ , erzielt werden, wobei sich die Mehrheit der Patienten innerhalb eines Bereichs von  $\pm 0,5$  Dpt vom Ziel abweichend ansiedelt. Im Vergleich zum entsprechenden Diagramm der PCCRI (Abbildung 72) kann hier eine deutliche Überlegenheit der torischen Linsen bezüglich der Effektivität der Astigmatismuskorrektur festgestellt werden. Bei der Implantation von torischen Linsen ist nicht mit einer solchen Unterkorrektur wie bei den PCCRI zu rechnen.

Der Ausdruck des entsprechenden IOS-Wertes auf der steilen Achse des präoperativen Astigmatismus ist durch nachstehendes Diagramm dargestellt:



**Abbildung 94:** Der IOS auf der Achse der geplanten Korrektur, Daten der refraktiven Auswertung, Gruppe II

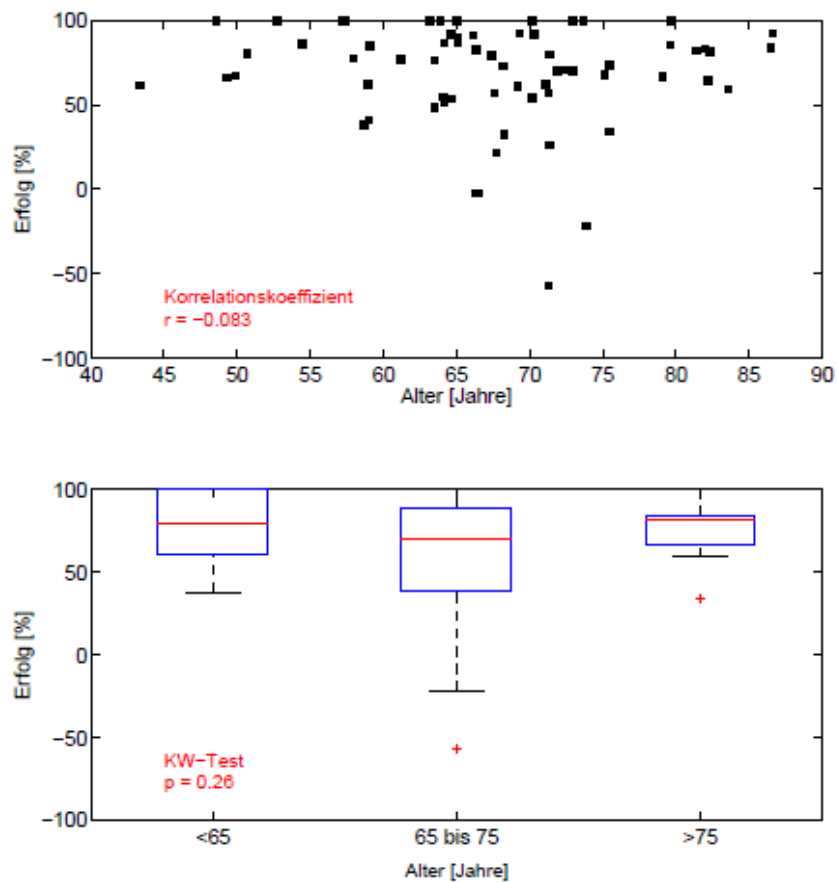
Der arithmetische Mittelwert für den „Erfolg der Astigmatismusreduktion“ aller Operationen liegt bei 68,8 %. Wenn es postoperativ zu einer Abnahme des präoperativen refraktiven Astigmatismus kommt, wird der refraktive Astigmatismus um 74,58 % reduziert (62 Augen); ist der postoperative refraktive Astigmatismus hingegen größer als präoperativ (4 Augen), kommt es zu einer refraktiven Zunahme des Astigmatismus um 20,88 %.

Carey *et al* [146] berichteten auch von einer Reduktion des präoperativen refraktiven Astigmatismus um 64,62 %.

In Anlehnung an die refraktive Auswertung der PCCRI in Zusammenhang mit dem Alter, der Achsenlänge und der Form des Astigmatismus wurde auch bei der Implantation von torischen Intraokularlinsen ein entsprechender Zusammenhang der Ergebnisse mit den o. g. Faktoren überprüft.

## Alter

Bezüglich des Alters der Patienten zeigt das folgende Diagramm, dass keine Korrelation zwischen dem Alter am Tag der Operation und dem refraktiven Erfolg der Operation besteht (Korrelationskoeffizient  $r = -0,083$ ). Auch nach Subgruppierung der Patienten in Alterssubgruppen (<65, 65 bis 75, >75 Jahre) zeigte sich kein signifikanter Unterschied des refraktiven Erfolgs der Operationen zwischen den Subgruppen ( $p = 0,26$ ).

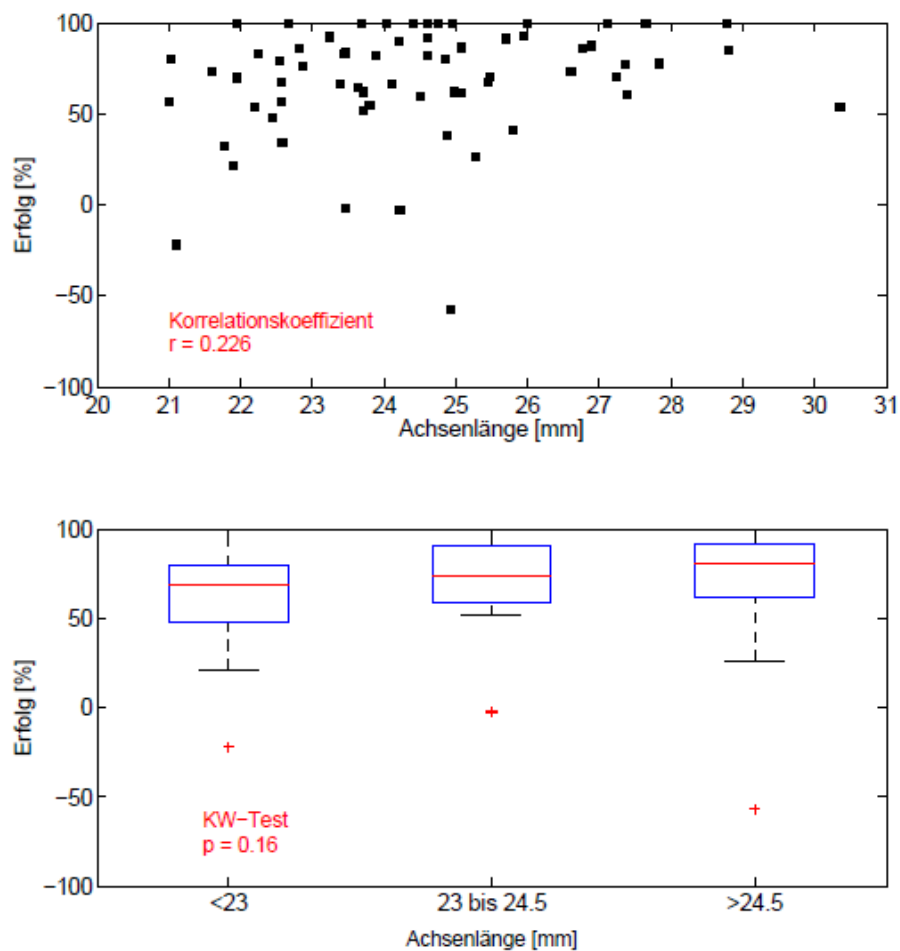


**Abbildung 95:** Korrelation zwischen dem Alter der Patienten am Tag der Operation und dem Erfolg der Astigmatismusreduktion, Daten der refraktiven Auswertung, Gruppe II

Vereinbar mit diesem Ergebnis ist die Publikation vom *Rozema et al* [147], wobei keine Korrelation zwischen postoperativer Rotation der torischen Intraokularlinsen und dem Alter der Patienten nachgewiesen werden konnte.

### Achsenlänge

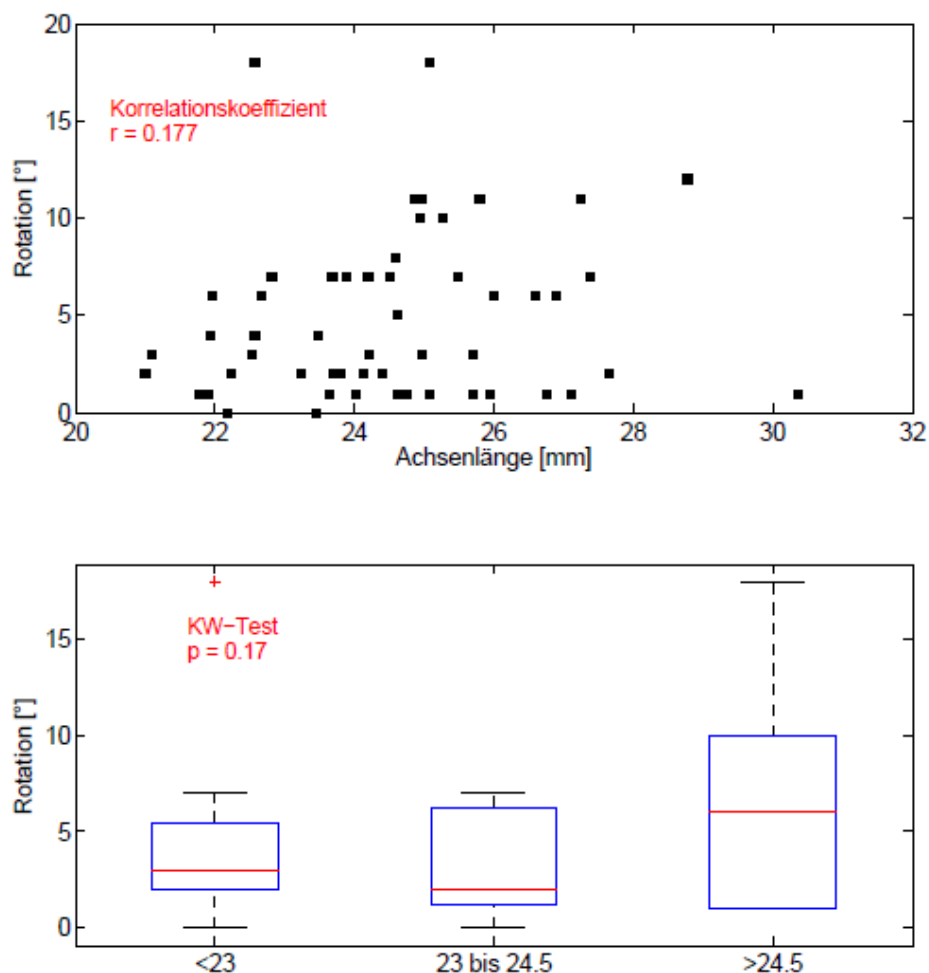
Bezüglich der Achsenlänge der operierten Augen zeigt das nachstehende Diagramm, dass keine Korrelation zwischen der Achsenlänge und dem refraktiven Erfolg der Operation besteht (Korrelationskoeffizient  $r = -0,226$ ). Auch nach Subgruppierung der Patienten (< 23 mm, 23 bis 24,5 mm, > 24,5 mm) zeigte sich kein signifikanter Unterschied des refraktiven Erfolgs der Operationen zwischen den Subgruppen ( $p = 0,16$ ).



**Abbildung 96:** Korrelation zwischen der Achsenlänge der operierten Augen und dem Erfolg der Astigmatismusreduktion, Daten der refraktiven Auswertung, Gruppe II

Keine der bisherigen Veröffentlichungen zeigten eine Korrelation zwischen der Achsenlänge und der postoperativen Rotation der implantierten torischen Intraokularlinsen.

Das folgende Diagramm verdeutlicht, dass keine Korrelation zwischen der Achsenlänge der operierten Augen und der postoperativen Achsenabweichung der implantierten torischen Intraokularlinsen besteht (Korrelationskoeffizient  $r = 0,177$ ). Auch nach Subgruppierung der Patienten (< 23 mm, 23 bis 24,5 mm, > 24,5 mm) zeigte sich kein signifikanter Unterschied der postoperativen Achsenabweichung der implantierten torischen Intraokularlinsen innerhalb der Subgruppen ( $p = 0,17$ ).



**Abbildung 97:** Korrelation zwischen der Achsenlänge der operierten Augen und der postoperativen Linsenrotation, Daten der refraktiven Auswertung, Gruppe II

### Postoperative Korrektur der Linsenposition

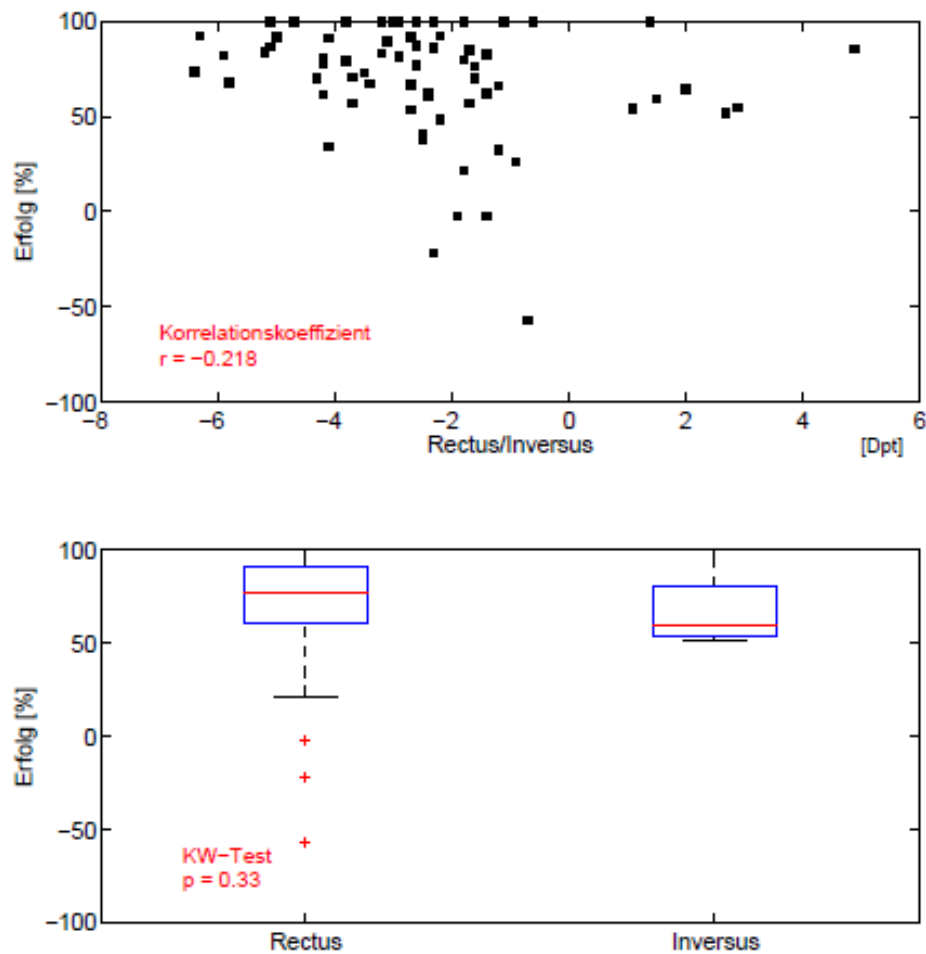
Unter den 66 Augen der Gruppe II war in zwei Fällen eine postoperative Korrektur der Positionierung der torischen Intraokularlinse notwendig. Nach der Rotation der Linsen lag deren Achse deutlich näher zu der Zielachse.

Patient	Zielachse	Postoperative Achse	Postoperative Achse nach Korrekturrotation
T034	113	130	115
T069	79	48	72

**Tabelle 4:** Patienten mit hoher postoperativer Achsenabweichung der implantierten TIOL wobei eine Korrektur der Linsenposition mit postoperativer Rotation notwendig war

### Form des Astigmatismus

Bezüglich der Form des präoperativen Astigmatismus zeigt das folgende Diagramm, dass keine Korrelation zwischen dem Vorliegen von einem Astigmatismus rectus oder inversus und dem refraktiven Erfolg der Operation besteht (Korrelationskoeffizient  $r = -0,218$ ). Auch nach Subgruppierung der Patienten (Astigmatismus rectus, Astigmatismus inversus) ließ sich kein signifikanter Unterschied des refraktiven Erfolgs der Operationen zwischen den Subgruppen ( $p = 0,33$ ) feststellen.



**Abbildung 98:** Korrelation zwischen der Form des präoperativen Astigmatismus und dem Erfolg der Astigmatismusreduktion, Daten der refraktiven Auswertung, Gruppe II

Das Ergebnis ist so zu interpretieren, dass die Achse der Positionierung der torischen Linse im Kapselsack keine statistisch signifikante Rolle für das Ergebnis der Operation spielt.

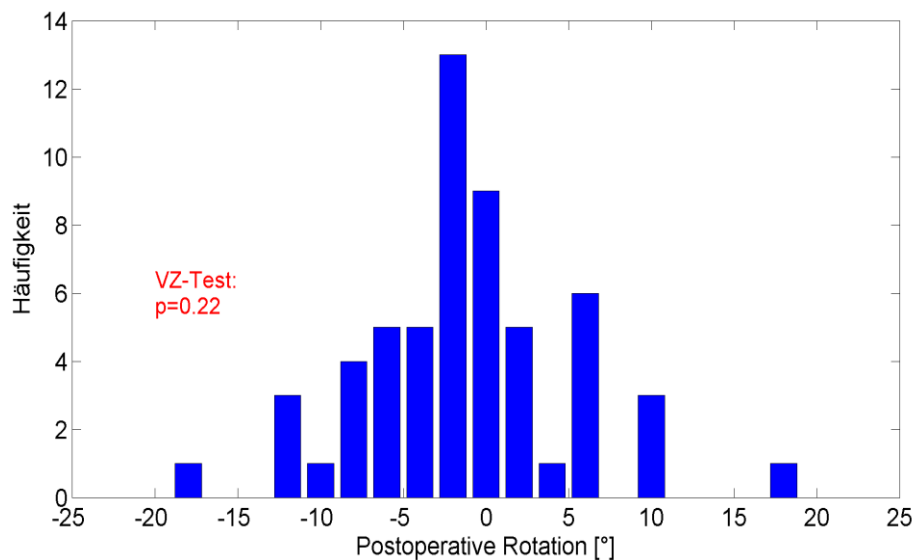
Dies stimmt mit dem Ergebnis der Studie von *Ernest et al* [148] und *Shah et al* [107] überein, wonach die Achse des vorliegenden präoperativen Hornhautastigmatismus und somit die Achse der Positionierung der torischen Intraokularlinse im Kapselsack keinen Einfluss auf die Ergebnisse der Astigmatismuskorrektur mittels torischer Intraokularlinsen zeigte.

Der mittlere refraktive präoperative Astigmatismus in Gruppe II betrug  $2,96 \pm 1,65$  Dpt, wohingegen sich der mittlere postoperative auf  $0,70 \pm 0,55$  Dpt belief. Es kam zu einer Reduktion der Größe des bestehenden refraktiven Astigmatismus um  $-2,26 \pm 1,57$  Dpt.

Von ähnlichen Ergebnissen berichten auch andere Autoren; eine Darstellung der Ergebnisse dieser publizierten Studien erfolgt in der Diskussion.

### Postoperative Achsenabweichung

Folgendes Diagramm präsentiert die postoperative Achsenabweichung der torischen Intraokularlinsen:



**Abbildung 99:** Postoperative Achsenabweichung der TIOL von der präoperativ angestrebten Achse (°)

Die negativen Werte stellen eine postoperative Achsendrehung der torischen Intraokularlinse gegen den Uhrzeigersinn dar, während positive Werte eine postoperative Achsendrehung im Uhrzeigersinn widerspiegeln. Die statistische Auswertung der postoperativen Achsenrotation mittels des Vorzeichen-tests zeigte keine statistisch signifikante postoperative Tendenz in eine Richtung („im Uhrzeigersinn“ oder „gegen den Uhrzeigersinn“) in unserem Patientengut.



In der Publikation von *Zuberbuchler et al* [149] wurde ebenso wenig eine Tendenz zu einer bestimmten postoperativen Achsenabweichung der implantierten torischen Intraokularlinsen festgestellt. Ältere Untersuchungen von früheren Modellen torischer Intraokularlinsen hatten eine Tendenz zu einer postoperativen Achsenabweichung „gegen den Uhrzeigersinn“ gezeigt [98][*Shimizu et al*, 1994], [101][*Patel et al*, 1999].

Insgesamt zeigten 88 % der implantierten Linsen eine Rotation von weniger als 10°.

Die Ergebnisse der Auswertung der Gruppe II bezüglich der Effektivität der Methode sind kumulativ in folgender Tabelle vereint:

Mittelwerte	Refraktiv	
	Präoperativ	Postoperativ
<b>Astigmatismus (Dpt) ± SD</b>	<b>2,96 ± 1,65</b>	<b>0,70 ± 0,55</b>
<b>Astigmatismus- Reduktion (Dpt)</b>	<b>2,26 ± 1,57</b>	
<b>SIA (Dpt)</b>	<b>3,04 ± 1,24</b>	
<b>DV (Dpt)</b>	<b>0,70 ± 0,55</b>	
<b>IOS (geometrischer Mittelwert)</b>	<b>0,22</b>	
<b>Achsenabweichung ° ± SD</b>	<b>4,77 ± 4,18</b>	

**Tabelle 5:** Die Effektivität der Astigmatismusreduktion durch Implantation von TIOL St. Vincentius Augenklinik der Vincentius-Diakonissen-Kliniken gAG, Karlsruhe

## 4. Diskussion

### 4.1 Astigmatismusreduktion im Allgemeinen

In den letzten Jahren lässt sich weltweit eine zunehmende Tendenz beobachten, wonach sich die Kataraktchirurgie zur refraktiven Chirurgie entwickelt. Studien mit Ergebnissen von astigmatismusreduzierenden Verfahren werden häufiger in internationalen ophthalmologischen Zeitschriften publiziert. Meistens handelt es sich um kleinere Gruppen mit individualisierten und idealen Parametern (z. B. gleicher Operateur, gleiche Intraokularlinse, keine Augenkomorbiditäten usw.). Bei präziser präoperativer, intraoperativer und postoperativer Vorgehensweise sind auch in einer großen Institution im klinischen Alltag durchaus Ergebnisse zu erzielen, wie wir sie von besser kontrollierten Studien kennen. In der Praxis spielen verschiedene Faktoren eine Rolle (z. B. unterschiedliche Operateure, unterschiedliche Modelle von Intraokularlinsen, die Technik für das präoperative Markierungsvorgehen der steilen Achse des Astigmatismus, ein Patientengut mit Variation der demographischen Parameter, sozioökonomische Besonderheiten sowie die postoperative Therapie, die Intervalle der Nachkontrollen und das Patientenverhalten bzw. deren Erwartungen).

Sehr interessant ist es deshalb sicherlich, eine Auswertung dieser astigmatismuskorrigierenden Methoden im Rahmen des alltäglichen Ablaufs einer Klinik durchzuführen, um zu überprüfen, ob Ähnlichkeiten zwischen den bisher publizierten Ergebnissen zur Astigmatismuskorrektur mittels peripherer Clear-Cornea-Relaxationsinzisionen (PCCRI) und den Ergebnissen mittels torischer Intraokularlinsen bestehen.

Bei der statistischen Auswertung der beiden o. g. astigmatismusreduzierenden Methoden sind in dieser Studie lediglich topographische Daten und Daten der subjektiven Refraktion präoperativ und postoperativ ohne besondere Rückschlüsse auf die Sehschärfe ausgewertet worden. Der Grund dafür ist, dass es sich um ein inhomogenes Patientengut im Hinblick auf sonstige Augenkomorbiditäten handelte. Wie in einer großen Au-

genklinik zu erwarten, wird auch in unserer Klinik eine erhebliche Anzahl von Patienten an Katarakt operiert, die zum Zeitpunkt der Operation weitere ophthalmologische Pathologien und Risikofaktoren zeigt (Glaukom, altersbedingte Makuladegeneration, diabetische Augenveränderungen, bei Zustand nach sonstigen ophthalmochirurgischen Eingriffen oder Verletzungen, Pseudoexfoliation, Floppy-Iris-Syndrom, hohe Ametropien, fortgeschrittenes Alter). Die betreffenden Patienten haben ein individuell zu bestimmendes Maximum an Sehschärfeerwartung. Der Vergleich der Ergebnisse unter Augen mit unterschiedlichen Komorbiditäten ist klinisch nicht sinnvoll. Allerdings erlaubt die Auswertung sowohl der topographischen Daten als auch der subjektiv wahrgenommenen Refraktionswerte bei der Bestimmung der bestkorrigierten Sehschärfe postoperativ Schlussfolgerungen auf die Ergebnisse und liefert äußerst interessante und zuverlässige Informationen bezüglich der Effektivität der angewandten astigmatismuskorrigierenden Methoden.

Bei der Interpretation der Ergebnisse dieser Studie wurden bisher publizierte Ergebnisse und bekannte Schlussfolgerungen der internationalen Bibliographie nicht als selbstverständlich unterstellt. Die vorliegende Studie, die ein inhomogenes Patientengut mit multiplen Augenkomborbiditäten, unterschiedliche Operateure mit unterschiedlicher operativer Erfahrung und ein Kunstlinsenspektrum mit unterschiedlichen Linsentypen einschließt, sollte überprüfen, ob die bekannten Schlussfolgerungen anderer Publikationen auch auf die astigmatismusreduzierenden Verfahren der St. Vincentius Augenklinik der Vincentius-Diakonissen-Kliniken gAG, Karlsruhe zu übertragen sind.

Vor der statistischen Auswertung der operativen Ergebnisse wurde von einer astigmatismusneutralen Kataraktoperation durch eine 2,8 mm breite, nahtlose und selbstabdichtende Clear-Cornea-Inzision ausgegangen [150][Giansanti et al, 2006], [151][Tejedor et al, 2008]. Bei unseren Patienten wurde eine temporal gelegene 2,8 mm Clear-Cornea-Inzision oder „nahezu Clear“-Cornea-Inzision („*near clear*“ *corneal incision*) durchgeführt.

Die mathematische Auswertung der refraktiven Veränderungen des sphärischen Anteils der Refraktion ist eher unproblematisch. Das ist jedoch nicht der Fall bei der Auswertung der refraktiven Veränderung des astigmati-

schen Anteils der Refraktion. Hier ist es notwendig – um die mathematischen Formeln direkt anwenden zu können – zuerst die astigmatischen Daten in geeignete Größen umzuwandeln. Dieser Vorgang wurde bereits in Kapitel „Astigmatismusanalyse“ ausführlich beschrieben. Das vereinfachte Addieren, Subtrahieren oder die Berechnung von Mittelwerten einer vektorischen Größe wie Astigmatismus ist in der Analyse der astigmatismusreduzierenden Eingriffe nicht zulässig und führt zu lediglich arithmetisch korrekten Ergebnissen, jedoch ohne klinische Bedeutung. Publikationen, die eine vereinfachte mathematische Astigmatismusanalyse anwenden, sollten deswegen kritisch betrachtet werden.

Aktuell existiert kein einheitliches, standardisiertes, mathematisches Modell für die Analyse astigmatischer Veränderungen. Die hier angewandte Analyse des Astigmatismus, welche mit den Publikationen von drei weltweit anerkannten refraktiven Ophthalmochirurgen (*Dr. Alpins, Dr. Naeser, Dr. Holladay*) vereinbar ist, gewährleistet die Richtigkeit, die Wiederholbarkeit und eine weltweite Akzeptanz der Ergebnisse. Die Ergebnisse der Analyse eines refraktiven Eingriffes sollten jedoch unabhängig davon sein, welche Auswertungsmethode angewandt wurde.

Bei der Auswertung von astigmatischen Veränderungen einer operativen Methode sollten die Veränderungen an unterschiedlichen Ausdrucksformen des vorliegenden Astigmatismus (der objektive korneale sowie der subjektiv bei der Korrektur angenommene Astigmatismus) untersucht werden.

Die Astigmatismusanalyse ermöglicht es, Indizes zu kalkulieren, welche einen Vergleich zwischen unterschiedlichen Methoden sowie zwischen unterschiedlichen Patientengruppen und unterschiedlichen Operateuren erlauben.

Teilweise wurden die einzelnen Ergebnisse bereits unmittelbar im Teil „Ergebnisse“ diskutiert und mit bekannten Ergebnissen verglichen. Hier wird eine Zusammenfassung der Schlussfolgerungen dieser Studie aufgezeigt.

## 4.2 PCCRI

### 4.2.1 Zeitliches Verhalten

Hinsichtlich des zeitlichen Verhaltens des Effektes der astigmatismuskorrigierenden Hornhautinzisionen konnte aufgezeigt werden, dass eine zeitliche Stabilität des Effektes zu beobachten ist. Die Ergebnisse dieser Studie waren diesbezüglich mit den bisherigen publizierten Ergebnissen von mehreren operativen Zentren weltweit vereinbar.

Dieses Ergebnis ist äußerst interessant, zumal es uns wichtige Schlussfolgerungen für den operativen Alltag liefert. Aufgrund der anatomischen Kenntnisse zur kornealen Wundheilung nach Hornhautinzisionen und zum Verhalten der Hornhaut posttraumatisch könnte vermutet werden, dass die Wirkung der astigmatismusreduzierenden Hornhautinzisionen direkt postoperativ höher sein und im zeitlichen Verlauf etwas nachlassen würde, bis es nach einigen Monaten zu einer Stabilisierung des Befundes kommen würde.

Die statistische Auswertung der Gruppe Ia zeigt, dass die anatomischen Veränderungen im Rahmen der Wundheilung keinen statistisch signifikanten Effekt auf den Erfolg der Operation haben. Es kann somit ein zeitlich stabiler, astigmatismusreduzierender Effekt der peripheren Clear-Cornea-Relaxationsinzisionen (PCCRI) gezeigt werden. Für die Praxis bedeutet das, dass es ausreichend ist, eine Kontrolle des Patienten schon ab der ersten postoperativen Woche durchzuführen, um den Effekt der Operation beurteilen zu können. Der postoperative Astigmatismusbetrag wird sich im zeitlichen Verlauf statistisch nicht signifikant ändern.

Die von uns beobachtete zeitliche Stabilität der astigmatismusreduzierenden Hornhautinzisionen ist auch in den Ergebnissen von mehreren Zentren weltweit aufgezeigt worden. *Carvalho et al* (Sao Paulo, Brasilien, 2007) [137], *Wang et al* (Texas, USA, 2003) [138], *Roman et al* (Paris, Frankreich, 2009) [152], *Shen et al* (Hangzhou, China, 2004) [153] und *Arraes et al* (Recife, Brasilien, 2006) [141] bestätigen eine zeitliche Stabilität der Inzisionen ohne statistisch signifikante Regression.

Ein großer Vorteil liegt darin, dass wir nunmehr in unserer Klinik von einer zeitlichen Stabilität der astigmatismusreduzierenden Inzisionen, unabhängig vom Operateur, ausgehen können. Da die Auswertung in unserem Patientengut mehrere Operateure umfasst, lässt sich sagen, dass die bisherigen, von anderen Operateuren publizierten Schlussfolgerungen bezüglich der Stabilität des Effektes der astigmatismusreduzierenden Hornhautinzisionen eine hohe Reproduzierbarkeit zeigen, ohne direkte Abhängigkeit vom Operateur. Das ist für den operativen Alltag besonders wichtig und insbesondere bei operativen Zentren, an denen mehrere Ophthalmochirurgen gleichzeitig tätig sind. Die Auswertung unseres bezüglich des Operateurs inhomogenen Patientenguts unterstützt weiterhin die Schlussfolgerung, dass die konkrete astigmatismusreduzierende Technik für große operative Zentren mit mehreren Operateuren unterschiedlicher operativer Erfahrung empfohlen werden kann. Es ist mit einer vorhersagbaren Effektivität der Methode zu rechnen.

#### **4.2.2 Statistisch signifikante Korrelationen**

Gemäß dem vorhandenen Nomogramm wurden anhand der präoperativen Größe und Achse des Astigmatismus sowie des Alters des Patienten die Tiefe und die Breite der astigmatismusreduzierenden Hornhautinzisionen (PCCRI) geplant. Die weitere statistische Auswertung der Ergebnisse der PCCRI sollte ausschließen, dass trotz der o. g. Planung gewisse statistisch signifikante Unterschiede der Ergebnisse vorliegen. Es konnte weder hinsichtlich der topographischen noch der refraktiven Auswertung der Ergebnisse ein statistisch signifikanter Zusammenhang zwischen der Effektivität der Methode und dem Alter der Patienten, der Achsenlänge der operierten Augen und der geplanten Tiefe und Breite der Hornhautinzisionen hergestellt werden.

Unsere Ergebnisse hinsichtlich des Alters der Patienten bei der Operation decken sich auch im Wesentlichen mit den bisher publizierten Daten. *Bradley et al* [140] berichten, dass die Subgruppierung der Patienten in „jünger als 70 Jahre“ und „älter als 70 Jahre“ keinen Einfluss auf die Ergebnisse hatte. Die Aussage von *Müller-Jensen et al* [154], dass Unterkorrekturen häufiger bei jüngeren Patienten, Überkorrekturen dagegen häufiger bei älteren Patien-

ten auftreten, konnte durch diese Studie nicht bestätigt werden. Diese Diskrepanz wäre eventuell durch die Anwendung von unterschiedlichen Nomogrammen zur präoperativen Planung der Inzisionen zu erklären. Das an unserer Klinik verwendete Nomogramm ist nach *Nichamin* [82] (siehe S. 58) modifiziert und berücksichtigt das Alter der Patienten durch eine stärkere Korrektur bei jüngeren Patienten.

Bezüglich der Faktoren „Achsenlänge“, „geplante Tiefe“ und „geplante Breite“ der PCCRI finden sich aktuell keine vergleichbaren Publikationen, welche den Einfluss dieser Faktoren auf die Effektivität der durchgeführten PCCRI untersuchen. Die Planung der Inzisionen in den unterschiedlichen operativen Zentren ist aufgrund von Unterschieden der präoperativen Nomogramme nicht einheitlich und somit ist auch kein direkter statistischer Vergleich möglich.

Für die Praxis in unserer Klinik stellt es gleichwohl eine interessante Schlussfolgerung dar, dass keine statistisch signifikanten Unterschiede zwischen den o. g. Subgruppen bezüglich „Alter“, „Achsenlänge“, „geplante Tiefe“ und „geplante Breite“ der PCCRI auftreten. Das lässt darauf schließen, dass die Planung der PCCRI durch das vorhandene Nomogramm keine systematischen Fehler generiert.

Interessant sind die Ergebnisse zudem, wenn die PCCRI im Verhältnis zur Form des vorliegenden Astigmatismus analysiert werden. Im Folgenden wird dies ausführlicher erläutert.

#### **4.2.3 Fehlkorrektur/ Überkorrektur durch PCCRI**

Zuvörderst sollte aber nochmals die Terminologie der Astigmatismusüberkorrektur erklärt werden. Eine Überkorrektur kann durch einen SIA (*Surgically Induced Astigmatism*), welcher größer als der TIA (*Target Induced Astigmatism*) ist, verursacht werden. Gleichzeitig tritt eine Achsendrehung des postoperativen Astigmatismus auf, ohne jedoch, dass unbedingt eine Zunahme der Größe des postoperativen Astigmatismus erfolgt.

Dies soll folgendes Beispiel erklären:

Präoperativer Astigmatismus	TIA ( <u>Target Induced Astigmatism</u> )	SIA ( <u>Surgically Induced Astigmatism</u> )	Postoperativer Astigmatismus	CI	IOS
2 Dpt/60°	2 Dpt/150°	3 Dpt/150°	1 Dpt/150°	1,5	0,5

**Tabelle 6:** Beispiel einer Fehlkorrektur durch PCCRI

Bei diesem Beispiel wurde ein größerer SIA (*Surgically Induced Astigmatism*) als der benötigte TIA (*Target Induced Astigmatism*) operativ induziert und so eine Überkorrektur erzeugt. Dies führte gleichwohl zu einer Reduktion der präoperativen Größe des Astigmatismus um 50 %, jedoch mit einer Achsendrehung von 90°. Es kam somit zu einer Überkorrektur des Astigmatismus insgesamt (Fehlkorrektur) im Vergleich zum präoperativ geplanten Ziel, allerdings zu keiner Überkorrektur der Größe des Astigmatismus an sich.

Deshalb erscheint es zur Vermeidung von Missverständnissen sinnvoll, stets klarzustellen, ob von einer Fehlkorrektur (Überkorrektur insgesamt) oder nur einer Überkorrektur der Größe des Astigmatismus die Rede ist.

Bei 8 von 110 operierten Augen kam es zu einer Fehlkorrektur (Überkorrektur insgesamt) des präoperativen Astigmatismus (*Surgically Induced Astigmatism* > *Target Induced Astigmatism* und somit *Correction Index* > 1). Bei sieben dieser Patienten lag präoperativ ein Astigmatismus inversus vor. Hier zeigte sich eine deutliche Achsendrehung des postoperativen topographischen Astigmatismus im Vergleich zu dem präoperativen topographischen Astigmatismus. Bei lediglich einem von 83 Patienten (1,2 %) mit präoperativem topographischem Astigmatismus rectus kam es zu einer Fehlkorrektur (Überkorrektur insgesamt), während es bei 7 von 27 Patienten (25,9 %) mit präoperativem topographischem Astigmatismus inversus zu einer Fehlkorrektur (Überkorrektur insgesamt) kam. Diese Beobachtung wurde auch von *Bradley et al* [140] beschrieben. Bei Patienten mit Astigmatismus inversus kommt es dennoch öfters zu einer höheren Reduktion der Größe des präoperativen



topographischen Astigmatismus (Abbildung 67), sodass das postoperative Ergebnis zwar eine kleinere Größe des Astigmatismus, aber eine deutliche Drehung der Achse zeigt. In der folgenden Tabelle werden die präoperativen sowie die postoperativen Werte des topographischen Astigmatismus bei den Patienten unseres Patientengutes mit einer Fehlkorrektur (Überkorrektur insgesamt) ihres Astigmatismus dargestellt. Wie bereits in Kapitel „Astigmatismusanalyse“, S. 69, erwähnt, weisen Werte des CI (Korrekturindex) über 1,0 auf eine Überkorrektur hin.

Patienten ID	präoperativer topographischer Astigmatismus		Postoperativer topographischer Astigmatismus		CI (Correction Index)	IOS (Index of Success)
	Dpt	Achse [°]	Dpt	Achse [°]		
L082	2,3	145,6	0,9	82,0	1,28	0,39
L093	1,6	6,0	0,5	127,8	1,17	0,31
L098	1,5	10,5	0,6	102,0	1,40	0,40
L040	1,7	25,0	0,4	148,5	1,11	0,24
L100	3,4	20,2	2,5	55,8	1,03	0,74
L119	3,1	170,1	1,2	98,2	1,33	0,39
L185	2,6	179,2	1,8	61,0	1,50	0,69
L195	1,6	94,8	0,6	25,0	1,31	0,38

**Tabelle 7:** Patienten mit einer Fehlkorrektur (Überkorrektur) des Astigmatismus, Gruppe I

Der Grund für dieses Verhalten im Falle des topographischen Astigmatismus inversus ist aus den vorliegenden Daten nicht eindeutig abzuleiten. Es liegt trotzdem keine statistisch signifikante Tendenz zu einer Fehlkorrektur (Überkorrektur insgesamt) des präoperativen Astigmatismus insgesamt bei Bestehen eines Astigmatismus inversus ( $p = 0,29$  nach dem exakten Test nach *Fischer*) vor.

Die Auswertung der prozentualen Veränderung der Größe des präoperativen refraktiven Astigmatismus zeigte, dass es sich bei Zunahme der Größe des postoperativen refraktiven Astigmatismus (12 von 110 Augen) um eine Zunahme der Größe des Astigmatismus im Mittelwert um 67,76 % handelte.

Diese erhebliche Zunahme der postoperativen Größe soll weitergehend erklärt werden. In der folgenden Tabelle werden daher die präoperativen wie auch die postoperativen Werte des refraktiven und topographischen Astigmatismus bei den Patienten mit einer postoperativen Zunahme der Größe des refraktiven Astigmatismus von mehr als 10 % dargestellt:

Nr	Präoperativer refraktiver Zylinder [Dpt]	Präoperativer topographischer Zylinder [Dpt]	Postoperativer refraktiver Zylinder [Dpt]	Postoperativer topographischer Zylinder [Dpt]
L099	-2,00	1,7	-2,50	1,9
L026	-0,75	2,5	-1,50	1,7
L149	-0,25	1,1	-0,50	0,8
L167	-0,75	2,0	-2,00	2,0
L187	-1,25	2,3	-1,75	2,2
L222	-2,00	3,0	-2,50	2,9
L245	-0,25	1,2	-0,75	0,8

**Tabelle 8:** Der Vergleich zwischen dem präoperativen und postoperativen Zylinder, refraktiv und topographisch, Gruppe I

Den o. g. Daten ist zu entnehmen, dass die meisten Patienten, die eine postoperative Zunahme der Größe des refraktiven Astigmatismus aufwiesen, mit ihren Brillen bereits präoperativ hinsichtlich des Astigmatismus im Vergleich zu dem topographischen Betrag unterkorrigiert waren. Eine eventuelle präoperative Unterkorrektur des vorliegenden Astigmatismus durch Brille oder auch der Ausgleich des präoperativ vorliegenden Hornhautastigmatismus durch den präoperativ vorhandenen lentikulären Astigmatismus könnte diese Abweichung zwischen subjektiv angenommener präoperativer Astigmatismuskorrektur und topographischem Betrag erklären. Postoperativ fehlt naturgemäß der Anteil des lentikulären Astigmatismus durch den intraoperativen Linsenaustausch, sodass der topographische Astigmatismus stärker ins Gewicht fällt. Entsprechend dem topographischen Astigmatismus wird dann eine stärkere refraktive Astigmatismuskorrektur durch eine Brille benötigt, was auch die mathematische Zunahme der Größe des refraktiven Astigmatismus erklärt. Insgesamt zeigt jedoch die klinische Interpretation dieser Fälle, dass es aufgrund der Durchführung der PCCRI in der Regel zu einer Abnahme des zu erwartenden postoperativen refraktiven Astigmatismus kommt. Deren An-

wendung zeigt auch in Fällen einer postoperativen Zunahme des refraktiven Astigmatismus eine tatsächliche Astigmatismusreduktion.

#### 4.2.4 Sicherheit – Effektivität der PCCRI

PCCRI sind eine astigmatismusreduzierende Methode, welche zwar eine hohe Sicherheit, gleichwohl eine relativ niedrige Effektivität zeigt. Dies wurde auch durch unser Patientengut bestätigt. Insgesamt konnte mittels dieser Methode eine Reduktion des topographischen Astigmatismus um ca. 40 %, des refraktiven Astigmatismus sogar um ca. 60 % erreicht werden. Ähnliche Ergebnisse sind von mehreren Operateuren weltweit publiziert [137][*Carvalho et al, 2003*], [140][*Bradley et al, 2006*], [141][*Arraes et al, 2006*], [142][*Gegge, 2006*] [vgl. Kapitel „Ergebnisse-Auswertung“].

Der Betrag der mittleren topographischen Astigmatismusreduktion lag bei  $0,83 \pm 0,63$  Dpt, während jener der mittleren refraktiven Astigmatismusreduktion bei  $1,33 \pm 1,08$  Dpt lag. Diese Ergebnisse sind, wie bereits in Kapitel „Ergebnisse-Auswertung“ erwähnt, auch mit den bisher publizierten Studien vereinbar [137][*Carvalho et al, 2003*], [144][*Bayramlar et al, 2003*].

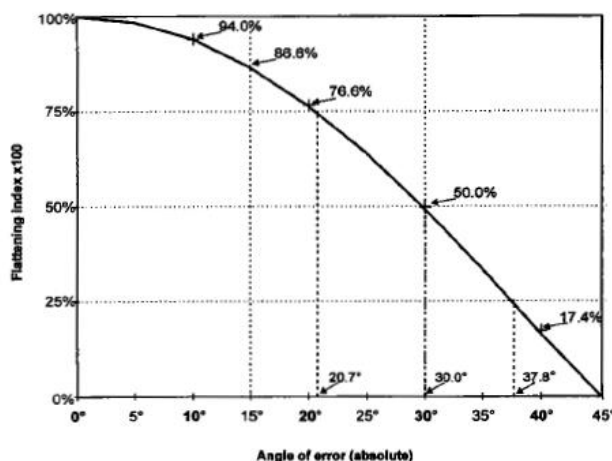
Der Betrag des präoperativen Astigmatismus, der durch PCCRI zu korrigieren ist, lässt schlussfolgern, dass die Korrektur eines präoperativen Astigmatismus bis zu einem Betrag von 1,5 Dpt durch PCCRI im Rahmen der modernen Kataraktchirurgie sinnvoll, effektiv und kostengünstig sein kann. Eine ähnliche Stellungnahme gaben *Kohnen et al* [155] ab. Höhere präoperative Beträge eines Astigmatismus können durch diese Methode auch reduziert werden, jedoch erfordert der postoperative Restastigmatismus weiterhin eine Brillenkorrektur. In diesen Fällen wird aufgrund der Nachteile dieser astigmatismuskorrigierenden Methode (z. B. Sicca-Problematik, Schwäche des Hornhautstromas gegenüber stumpfen Verletzungen) von der Durchführung abgeraten. Für diese Fälle wird, wie im Folgenden beschrieben, die Astigmatismuskorrektur mittels torischer Intraokularlinsen empfohlen.

#### 4.2.5 Vergleich der refraktiven und topographischen Auswertung

Stützt sich die postoperative Auswertung auf subjektive refraktive Daten, zeigen sich die Ergebnisse einer astigmatismuskorrigierenden Operation günstiger als würden die objektiven Daten zur Auswertung herangezogen werden [156][Alpins, 2001]. Diese statistisch signifikante Diskrepanz (KW-Test  $p = 0,0009$ ) wird auch durch diese Studie bestätigt.

#### 4.2.6. Der Einfluss der AE (Angle of Error)

Eine Abweichung der Achse des SIA (Surgically Induced Astigmatism) um  $30^\circ$  bewirkt, dass die Größe des resultierenden Zylinders unverändert im Vergleich zum präoperativen Zylinder ist. Eine  $45^\circ$ -Abweichung des SIA (Surgically Induced Astigmatism) löscht den Abflachungseffekt komplett aus, während sich bei Abweichungen des SIA (Surgically Induced Astigmatism) um  $90^\circ$  die Größe des Endastigmatismus verdoppelt [157][Naeser, 2008], [158][Alpins, 1997] (**Abbildung 40**).



**Abbildung 40:** Der Effekt der Achsenabweichung bei der Astigmatismuskorrektur auf den Abflachungsindex

(Alpins N., *Vector analysis of astigmatism changes by flattening, steepening, and torque*, J Cataract Refract Surg, Dez 1997, Band 23, S. 1512)

Die Auswertung der Ergebnisse im Hinblick auf den Winkel der Abweichung (AE, *Angle of Error*) zeigte, dass kein technikbedingter, systematischer Fehler vorliegt, sondern lediglich individuelle Faktoren für die Abweichungen

vom Ziel verantwortlich sind. Das bedeutet für uns, dass im Rahmen künftiger Modifikationen zur Optimierung der angewandten Technik keine technikbedingten Fehler zu verbessern sind, sondern nur individuelle Faktoren, die jeden einzelnen Patienten bzw. jeden einzelnen Operateur betreffen.

Sehr erfreulich ist, dass die Ergebnisse der statistischen Auswertung unseres inhomogenen Patientenguts im Allgemeinen mit bisherigen Publikationen von monofaktoriellen und homogeneren Gruppen von Patienten vereinbar sind. Das spricht für eine insgesamt verlässliche Vorhersagbarkeit der Effektivität der Methode, da sie unabhängig vom Operateur und sonstigen Faktoren zu einer relativ stabilen Reduktion des bestehenden Astigmatismus führt.

#### **4.2.7 Komplikationen**

Bezüglich der Komplikationen nach PCCRI wurden in der Gruppe der 110 Augen keine schwerwiegenden Komplikationen festgestellt. Bei lediglich einem Patienten war der direkte postoperative astigmatismusreduzierende Effekt so minimal, dass wir eine Wiederholung der PCCRI in einer getrennten Sitzung vornehmen mussten. Insgesamt bestätigt unsere Erfahrung die allgemeine Kenntnis, dass die Astigmatismuskorrektur mittels PCCRI eine sichere Methode darstellt.

Es ist jedoch nicht auszuschließen, dass die Durchführung von PCCRI einen komplizierteren Verlauf nehmen kann. Außerhalb der Gruppe der Patienten, die in dieser Studie eingeschlossen sind, traten unter Hunderten von Augen, die jährlich mit Phakoemulsifikation und PCCRI in unserer Klinik operiert werden, bislang zwei Fälle mit einem komplizierteren Verlauf auf. Bei einem Patienten kam es zu einer Infektion der astigmatismusreduzierenden kornealen Inzisionen und einer ausgeprägten bakteriellen Keratitis. Bei einem anderen Patienten kam es aufgrund einer zu tief gelegten Hornhautinzision bereits zu Beginn des Eingriffes zu einer langstreckigen Hornhautperforation, welche mit Hornhautnähten abgedichtet werden musste, wodurch ein zusätzlicher Astigmatismus induziert wurde.

#### 4.2.8 Optimierungsmöglichkeiten

Nach *Alpins* [159] kann durch Modifizierung und Entwicklung angepasster Nomogramme bei künftigen refraktiven Eingriffen eine höhere Genauigkeit und Effektivität erreicht werden. Bei der Modifizierung bestehender Nomogramme spielt die Standardisierung eine wichtige Rolle. Jeder Parameter, der standardisiert werden kann, sollte standardisiert werden (Messungen, Instrumente, operatives Verfahren) und Faktoren, die eine Variation der Ergebnisse bewirken könnten (Alter, Geschlecht, Grad des behandelnden Refraktionsfehlers), sollten identifiziert werden. Nach *Alpins* [159] sollte ebenso die Anpassung eines Nomogramms an individuelle Besonderheiten eines Operateurs oder einer Klinik weder zu früh, d. h. vor Vorliegen ausreichend wiederholbarer Ergebnisse, noch zu spät erfolgen.

Die Berechnung des „*Coefficient of Adjustment*“ einer Gruppe von Patienten erlaubt eine künftige Änderung des operativen Plans, um Ergebnisse weiter optimieren zu können. Der Mittelwert der „*Coefficient of Adjustment*“ sollte nicht arithmetisch, sondern als logarithmischer Mittelwert berechnet werden [160][*Alpins*, 2000]. Bei unserem Patientengut liegt der logarithmische Mittelwert der „*Coefficient of Adjustment*“ bei 2,17. Das bedeutet aus praktischer Sicht, dass die präoperative Planung (des präoperativen Nomogramms) entsprechend modifiziert werden müsste, sodass es zu einer 2,17-fachen Verstärkung des Effektes kommt, um eine ideale Korrektur in zukünftigen Eingriffen zu erreichen. Diese Schlussfolgerung sollte man jedoch etwas kritisch betrachten. Solche Verallgemeinerungen sollten nicht nur eine mathematische, sondern auch eine klinische Bedeutung haben. Wie bereits erwähnt, können theoretisch, um den Effekt künftiger Operationen auf die Korrektur der Größe des Astigmatismus zu optimieren, die Zahl der Inzisionen, der Durchmesser der optischen Zone, die Tiefe oder die Breite der Inzisionen modifiziert werden [129][*Alpins*, 1993]. Bei der Durchführung der PCCRI in unserer Klinik sind sowohl die Anzahl der Inzisionen (zwei Inzisionen an der Hornhaut) als auch die Tiefe der Inzisionen (95 % der Tiefe der peripheren Hornhaut) unseres Erachtens maximal dosiert. Die Breite der Inzisionen (Mittelwert von  $54,40^\circ \pm 12,59^\circ$ ) erscheint uns ebenso maximal dosiert, da zwei Inzisionen insgesamt ca.  $120^\circ$  der Hornhauperipherie betreffen. Breitere Schnitte an

der Augenoberfläche könnten sowohl zu einer Zunahme des häufig auftretenden postoperativen Trockenheitsgefühls als auch zu einer allgemeinen Abnahme der Stabilität der Hornhaut mit konsekutiver Abnahme des Schutzes gegen stumpfe Verletzungen führen. Wir würden deshalb von einer Vergrößerung der geplanten Breite der Inzisionen abraten. Eine Verschiebung der Inzisionen in einer optischen Zone kleineren Durchmessers (z. B. auf 7 mm) könnte zwar eine Zunahme der Effektivität der PCCRI bewirken, ist jedoch mit den Risiken der Überkorrektur einerseits und der Erzeugung von irregulärem Astigmatismus mit störenden Lichteffekten und Blendung andererseits verbunden. In diesem Fall könnte demnach die Effektivität der Methode mit einer Verminderung der Sicherheit einhergehen. Dieses Vorgehen ist aus unserer Sicht nicht empfehlenswert, zumal die Sicherheit der Methode eine ihrer größten Vorteile ist, besonders für die Anwendung in einem größeren operativen Zentrum mit mehreren Operateuren unterschiedlicher Erfahrung. Wir empfehlen daher nach wie vor die Durchführung astigmatismusreduzierender Hornhautinzisionen in der optischen Zone von 8 mm. Die klinische Bedeutung des „*Coefficient of Adjustment*“ ist somit nicht sehr hoch. Die Korrektur der einzelnen individuellen Faktoren, welche zu einer Unterkorrektur und Achsenabweichung führen, scheint nicht nur leichter, sondern auch effektiver als die Anpassung der bisherigen Nomogramme zu sein.

Durch die Anwendung von PCCRI ist eine Unterkorrektur des vorliegenden Astigmatismus unvermeidbar; gleichwohl kann eine entsprechende Patientenselektion zur ausgewählten Anwendung der Methode, z. B. für Astigmatismusbeträge kleiner als 1,5 Dpt, zu einer deutlichen Optimierung der postoperativen Ergebnisse und zu einer Reduktion der postoperativen Brillenabhängigkeit führen.

#### **4.2.9 Aussichten**

Bei allen unseren Patienten wurde als Ziel des refraktiven Eingriffes ein kornealer Astigmatismus von null angestrebt.

Es ist jedoch bekannt, dass der gesamte astigmatistische Betrag eines Auges im Laufe des Lebens nicht stabil bleibt. Sowohl der korneale als auch der gesamte okuläre Astigmatismus nehmen mit dem Alter zu und ändern sich „gegen die Regel“ um einen Betrag von ca. 0,14 Dpt pro fünf Jahre [161][*Gudmundsdottir et al*, 2000], [162][*Asano et al*, 2005], [163][*Alpins*, 1993]. Diese Tendenz ist möglicherweise auf strukturelle Veränderungen der Hornhaut zurückzuführen. Beide Radien – der vertikale als auch der horizontale Radius – verstreuen sich im Laufe des Lebens; der horizontale jedoch mehr als der vertikale. Dies führt insgesamt zu einer Tendenz „gegen die Regel“. Man könnte somit schlussfolgern, dass bei jüngeren Patienten, welche einem refraktiven Eingriff unterliegen, ein kleiner Betrag von „mit der Regel“-Restastigmatismus empfehlenswert wäre.

Die Perfektionierung der Methoden zur Astigmatismuskorrektur im Rahmen der modernen Kataraktchirurgie wird wahrscheinlich in Zukunft eine genauere Bestimmung der Zielrefraktion und des Ziel-Restastigmatismus erfordern. Darüber hinaus ist es sicherlich sinnvoll, weitere Studien zur Bestimmung des optimalen Ziel-Restastigmatismus durchzuführen.

Durch diese Studie sowie durch weitere Publikationen, z. B. *Wang et al* [138], lässt sich eine fragliche Korrelation zwischen dem präoperativen topographischen Astigmatismus inversus und der Effizienz der Astigmatismusreduktion durch PCCRI feststellen. Weitere Studien sollten den Zusammenhang zwischen der Form des vorliegenden Astigmatismus und der Effektivität der PCCRI untersuchen.

Die Anwendung des Femtosekundenlasers in der Kataraktchirurgie eröffnet neue Perspektiven in der Astigmatismuskorrektur mittels Hornhautinzisionen. Durch den Femtosekundenlaser können intrastromale Inzisionen mit höchster Präzision in Bezug auf Tiefe, Breite und Positionierung auf der Hornhaut durchgeführt werden. Dies könnte eine Optimierung der Präzision, der Effektivität und der Sicherheit der kornealen Inzisionen als Methode zur intraoperativen Astigmatismusreduktion im Rahmen der modernen Kataraktchirurgie bewirken. Künftige Studien sollen die statistische Signifikanz einer solchen Anwendung überprüfen.



### 4.3 Torische Intraokularlinsen

#### 4.3.1 Achsenabweichung

Einer der wichtigsten Faktoren, welcher bereits bei den ersten Anwendungen von torischen Intraokularlinsen zur Beurteilung des Effektes dieser Methode von größter Bedeutung war, war die postoperative Rotation der implantierten Intraokularlinsen. Die Beurteilung der postoperativen Achsenabweichung von torischen Intraokularlinsen ist durch Auswertung digitaler Fotos, mittels computergestützter Programme oder mit einer einfachen, klinischen Spaltlampenuntersuchung möglich. Die Beurteilung in unserer Klinik erfolgte durch Spaltlampenmikroskopie in medikamentöser Mydriasis, so wie es ausführlicher in Kapitel „Material und Methoden“, S. 63, beschrieben wurde. Nach *Mingo-Botin et al* [164] sind die Ergebnisse der Spaltlampenmikroskopie und des digitalen Fotografierens nicht signifikant unterschiedlich. Die Gleichwertigkeit bei der Bestimmung der Achse der torischen Intraokularlinse durch Spaltlampenmikroskopie und dem „Nidek OPD Scan System mit internal map“ wird auch durch *Carey et al* [146] bestätigt. Im klinischen Alltag eines großen operativen Zentrums ist die Beurteilung der Position einer torischen Intraokularlinse mittels digitaler Fotografie oder sonstiger Systeme mit erheblichem Zeitaufwand verbunden. Die Achsenbeurteilung mittels Spaltlampenmikroskopie vereinfacht die postoperative Kontrolle und reduziert die Untersuchungszeit des Patienten.

#### 4.3.2 Statistisch signifikante Korrelationen

Die statistische Auswertung der Ergebnisse der Astigmatismuskorrektur durch die Implantation von torischen Intraokularlinsen konnte keinen statistisch signifikanten Zusammenhang zwischen den refraktiven Ergebnissen und dem Alter der Patienten oder der geplanten Lage der torischen Intraokularlinse im Kapselsack nachweisen.

Andere Studien, welche den Einfluss der einzelnen Faktoren (Alter der Patienten und Form des präoperativ vorliegenden Astigmatismus bzw. Positi-

onierung der torischen Intraokularlinse im Kapselsack) auf die Ergebnisse der Astigmatismuskorrektur bzw. der postoperativen Rotation der torischen Intraokularlinsen überprüften, zeigen ebenso wenig einen signifikanten Zusammenhang [147][*Rozema et al*, 2009], [148][*Ernest et al*, 2011]. Die Unabhängigkeit der Effektivität der torischen Intraokularlinsen von sonstigen Faktoren wird damit erklärt, dass die verfügbaren Linsenmodelle technisch so weit entwickelt sind, dass heutzutage eine relativ hohe Stabilität im Kapselsack und somit eine hohe Effektivität der Astigmatismusreduktion erreicht werden.

Bezüglich des Einflusses der Achsenlänge der operierten Augen liegen bisher ambivalente Ergebnisse vor. *Tehrani et al* [111] berichten, dass eine kleinere Achsenlänge (Hyperopie) des Bulbus mit einem höheren Rotationsrisiko verbunden ist, da die Kapselschrumpfung geringer ausfällt und damit die Stabilität der Linse auch geringer ist. *Till et al* [110] bestätigen diese Beobachtung. In ihrer Studie waren 9 von 14 Augen mit postoperativer Achsenabweichung der torischen Intraokularlinse hyperop. Im Gegensatz dazu berichten *Patel et al* [101], dass ein gewisser Zusammenhang zwischen höherer Achsenlänge und stärkerer Rotation ( $> 30^\circ$ ) bei Plattenhaptiklinsen besteht. Dies deutet auf eine reduzierte äquatoriale Reibung und somit eine reduzierte Linsenstabilität im Kapselsack bei höherer Achsenlänge hin. In neueren publizierten Ergebnissen findet man auch eine Korrelation der Achsenlänge der operierten Augen und der postoperativen Abweichung der torischen Intraokularlinse von der Zielachse. *Shah et al* [107] berichten von einer größeren postoperativen Linsenrotation bei größerer Achsenlänge. In unserer Studie konnte jedoch kein statistisch signifikanter Zusammenhang zwischen Achsenlänge der operierten Augen und postoperativer Linsenrotation aufgezeigt werden.

#### 4.3.3 Sicherheit – Effektivität der TIOL

Bezüglich der Effektivität der Methode zeigt der statistische Vergleich zwischen BCVA präoperativ und UCVA postoperativ eine deutliche Überlegenheit der UCVA-Werte postoperativ. Die Patienten haben eine statistisch signifikant bessere Sehschärfe ohne Brillenkorrektur postoperativ im Ver-

gleich zu der besten Brillenkorrektur präoperativ. Dieser statistische Unterschied ist noch größer zwischen der präoperativen und postoperativen bestkorrigierten Sehschärfe der Patienten.

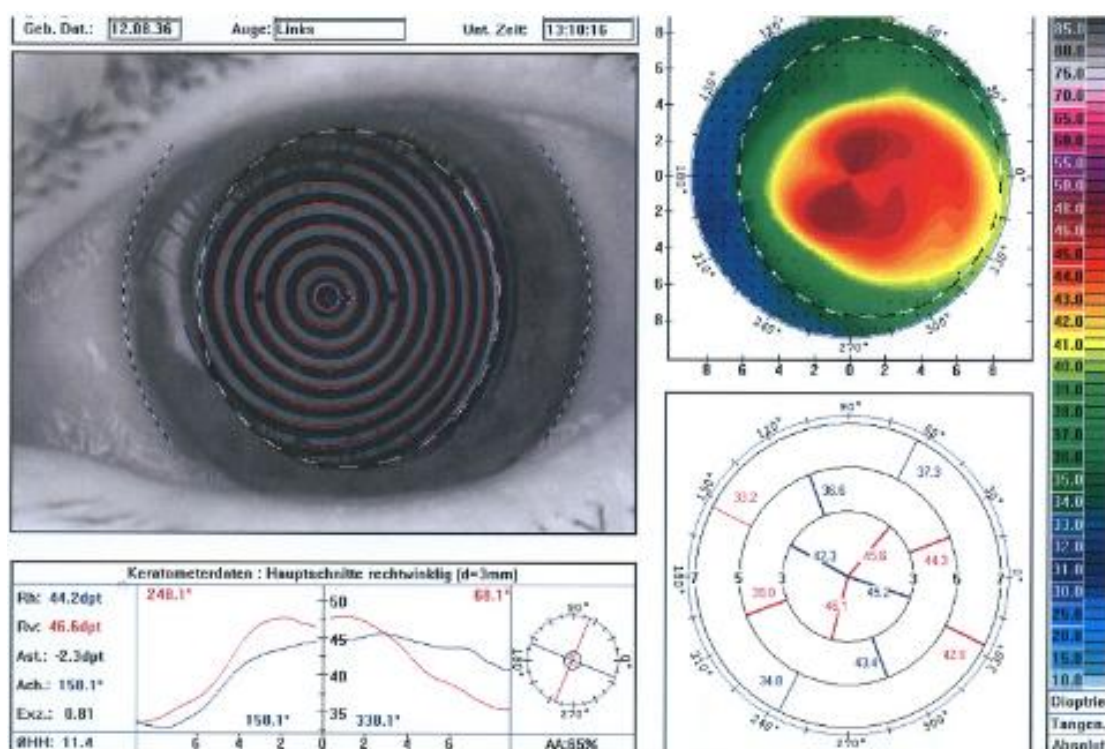
Hinsichtlich der Sicherheit der Methode finden wir bei unserem Patientengut 4 von 66 Augen (6 %) mit einem IOS (*Index of Success*) > 1, d. h. mit einem höheren postoperativen refraktiven Astigmatismusbetrag im Vergleich zu präoperativ. Die folgende Tabelle präsentiert den refraktiven und topographischen Betrag des vorhandenen präoperativen Astigmatismus, den Betrag des subjektiv angenommenen Zylinders postoperativ wie auch die angestrebte und erreichte Achse der torischen Intraokularlinse für diese Patienten.

Nr	Präoperativer refraktiver Zylinder [Dpt]	Präoperativer topographischer Zylinder [Dpt]	Zielachse [°]	Postoperativer refraktiver Zylinder [Dpt]	Postop-Achse [°]
T046	-0,50	-1,4	86	-0,50	90
T047	-0,25	-1,9	88	-0,25	85
T069	-1,50	-2,3	75	-2,25	72
T073	-0,50	-0,7	88	-0,75	78

**Tabelle 9:** Die Auswertung der Patienten der Gruppe II mit IOS > 1

Wie aus der oberen Tabelle erkennbar ist, hat nicht etwa eine große postoperative Achsenabweichung der Linsen zur Zunahme der Größe des refraktiven Astigmatismus geführt. Aus dieser Tabelle ist zu entnehmen, dass bei Patienten mit einer postoperativen Zunahme der Größe des refraktiven Astigmatismus eine präoperative Unterkorrektur ihrer Brillen im Vergleich zum topographischen Astigmatismusbetrag bestand. Eine eventuelle präoperative Unterkorrektur des vorliegenden Astigmatismus durch Brille oder auch der Ausgleich des präoperativ vorliegenden Hornhautastigmatismus durch den präoperativ vorhandenen lentikulären Astigmatismus könnten diese Abweichung zwischen subjektiv angenommener präoperativer Astigmatismuskorrektur und topographischem Betrag erklären. Postoperativ fehlt naturgemäß der Anteil des präoperativen lentikulären Astigmatismus durch den intraoperativen Linsenaustausch, sodass der Endastigmatismus eine Kombination des kornealen Anteils und des torischen Anteils der Intraokularlinse darstellt.

Um ein konkretes Beispiel anzuführen: Bei Patient T069 liegt trotz der guten Positionierung der torischen Intraokularlinse postoperativ ein höherer refraktiver Astigmatismus (2,25 Dpt) im Vergleich zum präoperativen Betrag (1,5 Dpt) vor. Dies lässt sich durch die Form des präoperativ vorhandenen kornealen Astigmatismus erklären, welcher eine deutliche zentrale Ausprägung zeigte (Abbildung 100). Das hat dazu geführt, eine stärkere als die idealerweise benötigte torische Intraokularlinse (Acrysof® SN60T7 +27,5, cyl 4,5) präoperativ zu berechnen und dadurch eine Zunahme des postoperativen Endastigmatismus iatrogen zu erzeugen.



**Abbildung 100:** Die präoperative Topographie des Patienten T069

Theoretisch könnte man bei den Patienten, bei denen es zu einer Überkorrektur des refraktiven Astigmatismus kommt, eine postoperative Linsenrotation in Erwägung ziehen, sodass gezielt eine Achsenabweichung von der Zielachse verursacht wird. Auf diese Weise würde eine Abschwächung des torischen Effektes der Linse erreicht, wie es in (Abbildung 41) präsentiert ist. Die Möglichkeit, im Falle einer Überkorrektur durch postoperatives Rotieren der Linse den astigmatismuskorrigierenden Effekt einer torischen Intraokularlinse abzuwächen, bietet eine zusätzliche Sicherheit gegenüber dem Risiko einer

Überkorrektur. Derartige Rotationen werden gleichwohl nicht oft durchgeführt, da eine Berechnung und Durchführung nicht einfach ist.

Ein anderes Beispiel ist der Patient T073, bei dem eine postoperative Achsenabweichung der torischen Intraokularlinse von  $10^\circ$  vorlag, er aber dennoch eine subjektive refraktive Korrektur von nur 0,75 Dpt annahm, so dass hier eine operative Korrektur der Position der torischen Intraokularlinse nicht erforderlich war.

Insgesamt zeigt die klinische Interpretation der o. g. Patientenbefunde, dass die Einzelfälle, bei denen es zu einer Zunahme des präoperativen Betrags des refraktiven Astigmatismus kommt, individuell zu interpretieren sind und keine systemischen Faktoren der Methode ursächlich dafür sind.

Die Implantation von torischen Intraokularlinsen ist eine astigmatismusreduzierende Methode, welche eine hohe Sicherheit und Effektivität bietet. Das wurde auch in unserem Patientengut bestätigt. Insgesamt konnte mittels dieser Methode eine Reduktion des refraktiven Astigmatismus um ca. 70 % erreicht werden. Ähnliche Ergebnisse sind auch von anderen Operateuren publiziert worden [146][Carey et al, 2010].

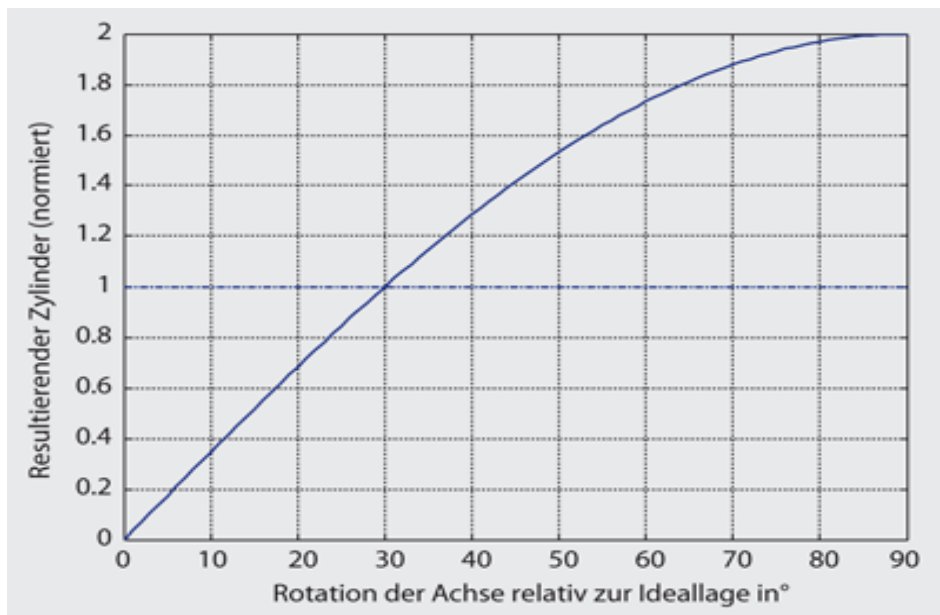
In vorliegender Studie war der Betrag der mittleren refraktiven Astigmatismusreduktion  $2,26 \pm 1,57$  Dpt. Die mittlere Achsenabweichung war  $4,77^\circ \pm 4,18^\circ$  (Minimum  $0^\circ$ , Maximum  $18^\circ$ ).

Zum Vergleich fasst die folgende Tabelle die Studienergebnisse unterschiedlicher operativer Zentren für unterschiedliche Linsentypen zusammen:

Autor	Linsen-Typ	Mittlere Achsen-Abweichung [°]	Achsen-Abweichung	Korrigierter Astigmatismus [Dpt]	Rest-Astigmatismus [Dpt]
aktuelle Studie	s. Material und Methoden	4,77 ± 4,18	88 % < 10°	-2,26 ± 1,57	0,70 ± 0,55
<i>Bascaran et al</i> , 2013 [165]	TORBI® 709 M	4,42 ± 4,31	86 % < 10°	-2,23 ± 1,72	-0,43 ± 0,53
<i>Shepard et al</i> , 2013 [166]	Tecnis®	3,4		1,91 ± 1,07	0,67 ± 0,54
<i>Alberdi et al</i> , 2012 [167]	Rayner T-flex® 573T und 623T		92,6 % < 10°		0,52 ± 0,63
<i>Debois et al</i> , 2012 [168]	Lentis® L313T	4,4 ± 3,6			-0,66 ± 0,56
<i>Chua et al</i> , 2012 [169]	Acrysof® Toric	4,23 ± 4,28	73 % < 5°		
	Staar®	9,42 ± 7,80	37 % < 5°		
<i>Hoffmann et al</i> , 2011 [170]	Acrysof® Toric		97,5 % < 10°		0,67 ± 0,32
<i>Li et al</i> , 2010 [171]	Acrysof® Toric	1,63 ± 1,83	96 % < 5°	2,02	0,67
<i>Mingo-Botín et al</i> , 2010 [164]	Acrysof® Toric	3,65 ± 2,96			0,61 ± 0,41
<i>Zarranz-Ventura et al</i> , 2010 [172]	Acrysof® Toric	3,87 ± 3,25	91,6 % < 10°	2,25 ± 0,78	-0,32 ± 0,56
<i>Wolffsohn et al</i> , 2010 [173]	Akreos AO mit Orientierungs-Markierungen	2,23 ± 1,84	90 % < 5°		
<i>Holland et al</i> , 2010 [174]	Acrysof® Toric		Mean = 4°		
<i>Koshy et al</i> , 2010 [175]	AcrySof® SN60TT	2,66 ± 1,99			
<i>Mendicute et al</i> , 2008 [176]	AcrySof® toric	3,63 ± 3,11	96,7 % < 10°	-2,34 ± 1,28	-0,72 ± 0,43
<i>Gerten et al</i> , 2001 [114]	600 TW Fa Dr. Schmidt		77 % < 10°	4,16 ± 1,58	1,64 ± 1,21

**Tabelle 10:** Vergleichstabelle der Ergebnisse nach Implantation von TIOL, multizentrisch

#### 4.3.4 Effekt der Achsenabweichung



**Abbildung 101:** Resultierender Astigmatismus nach TIOL-Implantation  
 Betrag des resultierenden Astigmatismus nach Implantation einer bei idealer Positionierung den kornealen Astigmatismus (bzw. den refraktiven Zylinder) vollständig korrigierenden, torischen Intraokularlinse; Abszisse: Winkel der Rotation der Linse bezogen auf die ideale Implantationsachse; Ordinate oben: Normierung auf initialen Hornhautastigmatismus; gestrichelte Linie: Effekt einer sphärischen Linse  
 (Mit Genehmigung von Springer Nature Customer Service Centre GmbH: Springer Medizin, Der Ophthalmologe, Band 107, Heft 2, Februar 2010) [177].

Das obere Diagramm zeigt, dass eine den initialen Astigmatismus vollständig korrigierende torische Intraokularlinse ab einer Abweichung von  $\geq 8^\circ$  von der geplanten Implantationsachse nachrotiert werden sollte [177][Langenbacher et al, 2010].

#### 4.3.5 Komplikationen

Sieht man von der potentiellen Achsenabweichung der torischen Intraokularlinse postoperativ ab, unterscheidet sich die Implantation von torischen Intraokularlinsen von der üblichen Kataraktchirurgie mit Phakoemulsifikation und Implantation monofokaler sphärischer bzw. asphärischer Hinterkammerlinsen bezüglich der möglichen Komplikationen nur unerheblich.

#### 4.3.6 Optimierungsmöglichkeiten

Zur Optimierung der Astigmatismuskorrektur mittels Implantation torischer Intraokularlinsen wird die Entwicklung von rotationsstabileren Intraokularlinsen fokussiert. Die aktuell verfügbaren Modelle von torischen Intraokularlinsen zeigen eine deutlich höhere Rotationsstabilität im Vergleich zu den ersten angewandten Modellen. Zukünftige Entwicklungen der Technik der torischen Intraokularlinsen werden weitere Studien zum Vergleich mit bisherigen Modellen erforderlich machen.

#### 4.3.7 Aussichten

Mit der Einführung von computerunterstützten Systemen im Rahmen ophthalmochirurgischer Eingriffe generieren sich auch neue Aussichten für die Astigmatismuskorrektur mittels Implantation torischer Intraokularlinsen. Neue Systeme, welche die intraoperative Augenerkennung und Markierung erlauben (Eye-Tracking-Systeme), können dazu beitragen, dass die Zentrierung und Achseneinrichtung bei der Implantation von torischen Intraokularlinsen noch zuverlässiger durchgeführt wird. Eine ausführliche Beschreibung dieser Eye-Tracking-Systeme erfolgte in der Einleitung dieser Arbeit (Kapitel „Limbusparallele astigmatismuskorrigierende Hornhautinzisionen“, S. 28). Weitere Studien könnten die Effektivität dieser computerunterstützten Systeme mit den bisherigen Ergebnissen der Implantation von torischen Intraokularlinsen vergleichen.

Nach Einführung eines solchen Eye-Tracking-Systems (VERION™ image guided system) in unserer Klinik war es für uns von großer Bedeutung, die Ergebnisse nach Anwendung des Eye-Tracking-Systems den Ergebnissen nach manueller präoperativer Markierung der Hornhaut, wie es im Kapitel „Material und Methoden“, S. 56, ausführlicher beschrieben wurde, gegenüber zu stellen.

Eine Gruppe von 46 Patienten (Gruppe „VERION“), welche konsekutiv in der Anfangsphase der Anwendung des Eye-Tracking-Systems *Verion Digital Marker*, Fa. Alcon, (Software Version 2.6.1) operiert wurden, wurde aus-

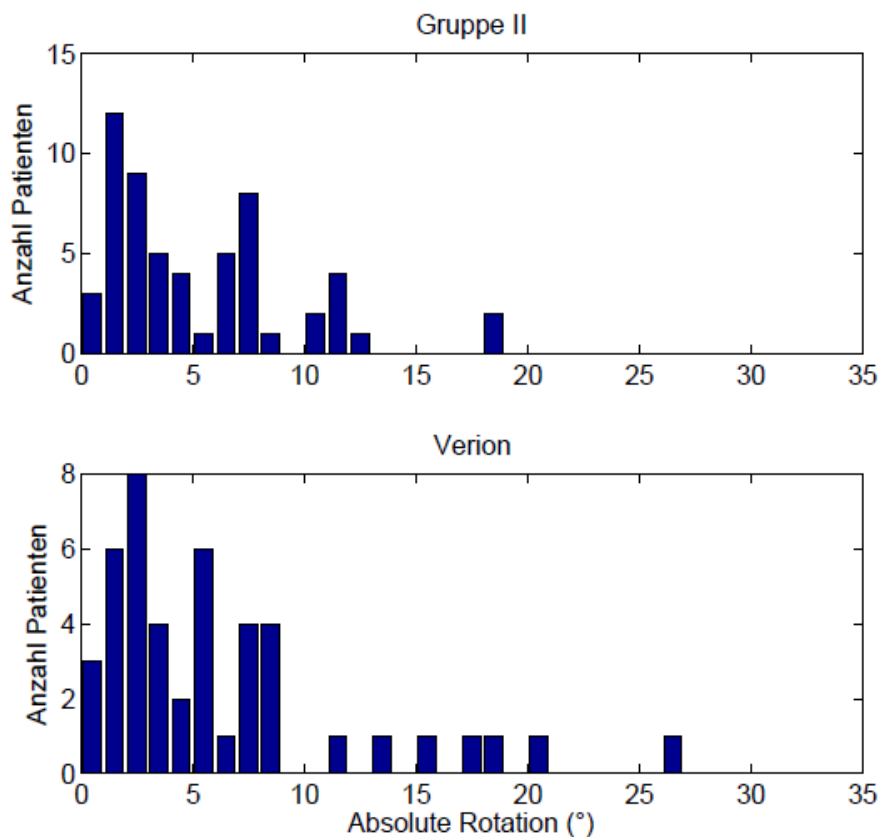


gewertet. Dabei wurde die mittlere Achsenabweichung der torischen Intraokularlinsen von der präoperativen Zielachse mit der mittleren Achsenabweichung der torischen Intraokularlinsen der Gruppe II dieser Studie verglichen. Eine Zusammenfassung der Ergebnisse wird in folgender Tabelle dargestellt:

	Gruppe II TIOL	Gruppe VERION
Mittelwert der Achsenabweichung	4,77°	6,89°
Standardabweichung	4,18°	9,71°
% der Fälle mit Achsenabweichung < 10°	84,2	84,4

**Tabelle 11:** Vergleich der Achsenabweichung der TIOL zwischen Gruppe II und Gruppe VERION

Die Verteilung der Werte der Achsenabweichung der TIOL für die Gruppe II und Gruppe „VERION“ wird in folgender Abbildung dargestellt:



**Abbildung 102:** Vergleich der Verteilung der Achsenabweichung der TIOL für die Gruppe II und VERION

Aus der oberen Abbildung geht eindeutig hervor, dass die Verteilung der Werte für die zwei Gruppen symmetrisch ist, sodass der Mittelwert und der Median für die beiden Gruppen asymptotisch gleich sind.

Um die Mediane der zwei Gruppen zu vergleichen, wurde der Kruskal-Wallis-Test [136][Handl, 2002] angewandt, da dieser Test ein robuster Test Ausreißern gegenüber, d. h. von diesen unabhängig ist, und keine Normalverteilung voraussetzt. Der Test auf Gleichwertigkeit der Mediane der o. g. Gruppen ( $p = 0,44$ ) zeigte keine statistisch signifikante Differenz der Mediane.

Ebenso wenig zeigte die Streuung der Verteilung der Werte der zwei o. g. Gruppen auch nach Anwendung des Ansari-Bradley-Tests ( $p = 0,86$ ) eine statistisch signifikante Differenz. Der Ansari-Bradley-Test prüft, ob ein signifikanter Unterschied hinsichtlich der Variabilität zwischen zwei Gruppen besteht. Voraussetzungen für die Anwendung des Ansari-Bradley-Tests sind, dass die Variablen unabhängig sind und stetige Verteilungsfunktionen sowie einen gleichen Median haben [178][Duller, 2008].

Neuere technologische Anwendungen im Rahmen der modernen Kataraktchirurgie erlauben ferner eine Optimierung der Ergebnisse bei der Implantation von TIOL. Durch das Einsetzen des Femtosekundenlasers in der Kataraktchirurgie sind eine exakte präoperative Planung und eine intraoperative Durchführung der Kapsulorhexis in der gewünschten Größe und Zentrierung möglich. Dies hat einen Einfluss, wie bereits in der Einleitung zu torischen intraokularen Linsen (S. 50) erwähnt, auf die Zentrierung bzw. die postoperative Rotation der TIOL und demzufolge auf die Präzision, die Effektivität und die Sicherheit der Methode zur Astigmatismusreduktion. Weitere Studien sollten untersuchen, ob durch die Anwendung des Femtosekundenlasers in der Kataraktchirurgie die Ergebnisse der Astigmatismuskorrektur durch TIOL statistisch signifikant optimiert werden können.

#### **4.3.8 Sulcusimplantation**

Alle Intraokularlinsen, die in dieser Studie untersucht worden sind, wurden in den Kapselsack komplikationslos implantiert. Bei der Durchführung der Astigmatismuskorrektur mittels Implantation torischer Intraokularlinsen, welche in den letzten Jahren mehrfach in unserer Klinik durchgeführt wurde, kann lediglich von zwei Fällen einer komplizierten Kataraktoperation mit Implantation der geplanten torischen Intraokularlinse in dem Sulcus berichtet werden. In diesen Fällen zeigte sich eine postoperative Rotation der Linse von der angestrebten Achse von  $23^\circ$  bzw.  $13^\circ$ . Es lässt sich somit eine signifikante Instabilität der Zentrierung der torischen Intraokularlinse nach Sulcusimplantation ableiten. Sicherlich sind weitere Studien sinnvoll, um die Quantifizierung des Betrags und der Richtung dieser postoperativen Rotationen bestimmen zu können. Für die Sulcusimplantation sind mittlerweile eigens dafür vorgesehene Modelle torischer IOL verfügbar.

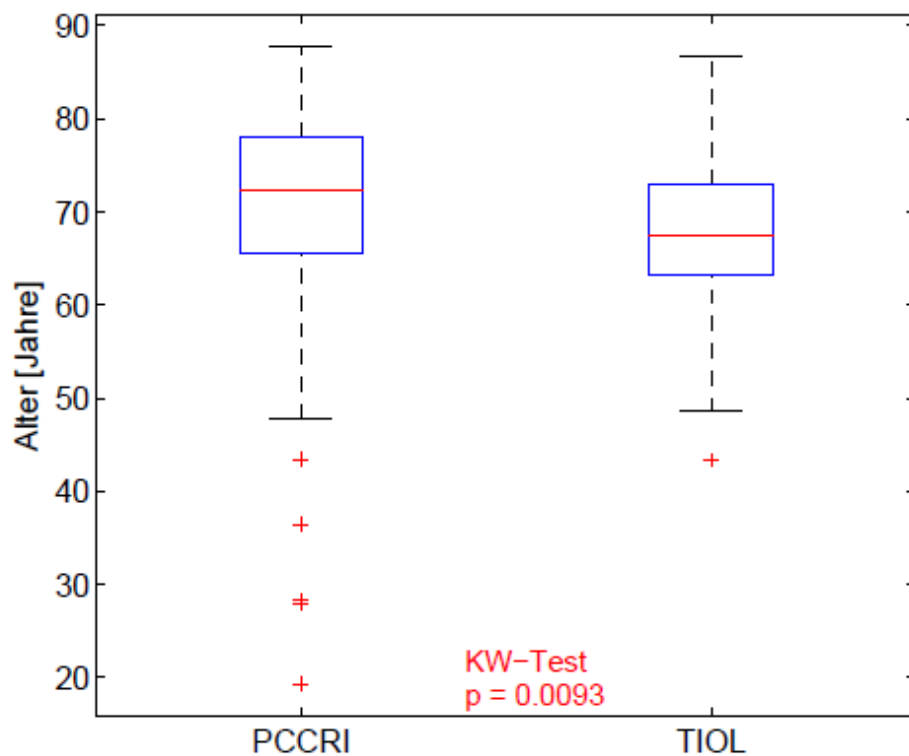
Wie bereits zur Perspektive der Anwendung der PCCRI angesprochen, ist auch bei der Anwendung von torischen Intraokularlinsen in Zukunft eine genauere Bestimmung der Zielrefraktion und des Ziel-Restastigmatismus erforderlich. Darüber hinaus ist es sicherlich sinnvoll, weitere Studien zur Bestimmung des optimalen Ziel-Restastigmatismus durchzuführen.

#### **4.4 Vergleich der Ergebnisse zwischen PCCRI und TIOL**

Sowohl die Astigmatismusreduktion mittels PCCRI als auch mittels Implantation von TIOL wird aktuell auf täglicher Basis in unserer Klinik durchgeführt. Ferner lassen sich sowohl klinisch als auch durch die bisherige statistische Auswertung Unterschiede zwischen beiden Methoden vermuten.

##### **4.4.1 Alter**

Nachstehendes Diagramm präsentiert den statistischen Vergleich bezüglich des Alters der Patienten am Tag der Operation:

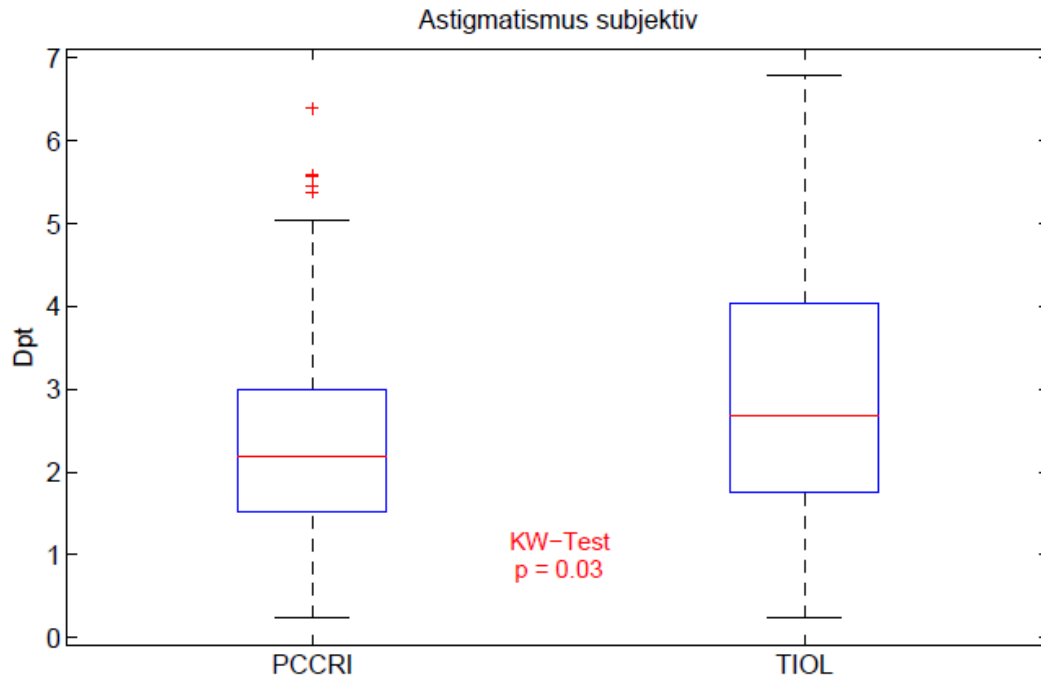


**Abbildung 103:** Statistischer Vergleich des Alters am Tag der Operation zwischen Gruppe I und II

Der statistische Unterschied zwischen den zwei Gruppen ( $p = 0,0093$ ) kann nach der  $\alpha$ -Adjustierung nach Bonferroni ( $\alpha < 0,0017$ ) keine statistische Signifikanz nachweisen. Es ist jedoch mit im Durchschnitt jüngeren Patienten in der Gruppe II zu rechnen. Dies lässt sich unter Umständen damit erklären, dass jüngere Patienten im Vergleich zu älteren Patienten eher bereit sind, die zusätzlichen Kosten einer relativ teuren Behandlung (Implantation von TIOL) als private Leistung zu übernehmen. Bei älteren Patienten war die Astigmatismuskorrektur mittels TIOL häufiger als bei jüngeren Patienten entweder nicht erwünscht oder nicht sinnvoll, sodass die Behandlung des vorliegenden kornealen Astigmatismus im Rahmen der Kataraktchirurgie häufiger durch PCCRI durchgeführt wurde.

#### 4.4.2 Präoperativ vorhandener Astigmatismus

Der Vergleich der präoperativen refraktiven Zylinderwerte der Patienten wird in folgendem Diagramm dargestellt:

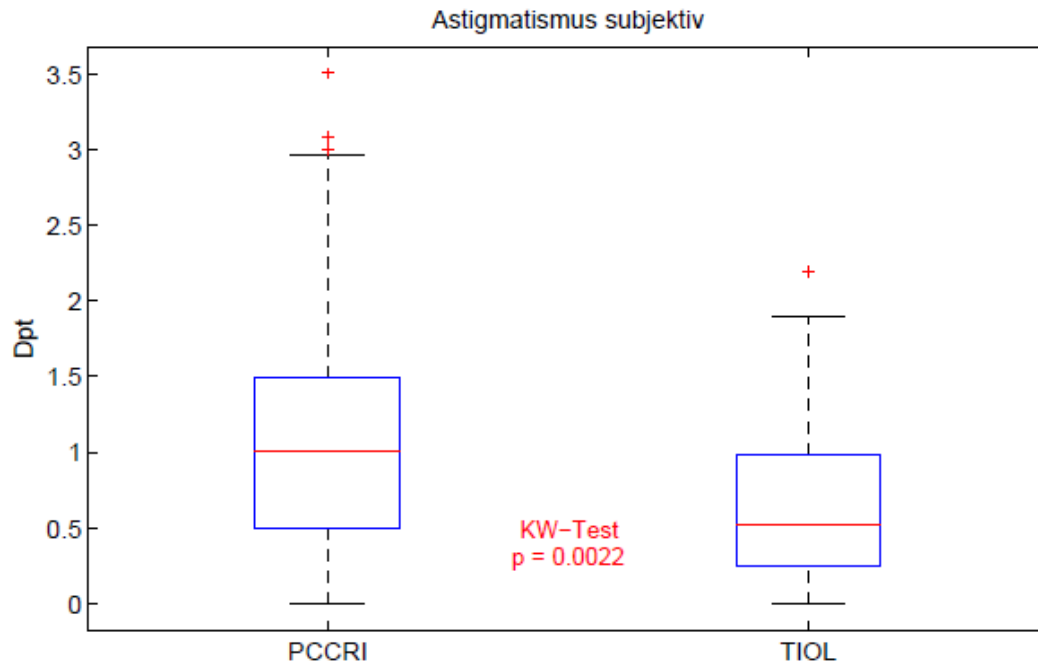


**Abbildung 104:** Der präoperative refraktive Astigmatismus, Gruppe I und Gruppe II

Der statistische Unterschied zwischen den zwei Gruppen ( $p = 0,03$ ) kann nach der  $\alpha$ -Adjustierung nach Bonferroni ( $\alpha < 0,0017$ ) keine statistische Signifikanz nachweisen. Es ist jedoch mit im Durchschnitt höheren präoperativen Zylinderwerten in der Gruppe der torischen Intraokularlinsen zu rechnen. Wie bereits erwähnt, verbleibt trotz Korrektur eines präoperativen Astigmatismus, der höher als 1,5 Dpt ist, mittels PCCRI ein postoperativer refraktiver Restastigmatismus, der klinisch signifikant ist. Dies erklärt, dass Patienten mit einem höheren Betrag an präoperativem Astigmatismus bevorzugt mittels der Implantation von torischen Intraokularlinsen korrigiert wurden.

#### 4.4.3 Postoperativ vorhandener Astigmatismus

Der Vergleich der postoperativen refraktiven Zylinderwerte der Patienten wird in folgendem Diagramm erläutert:

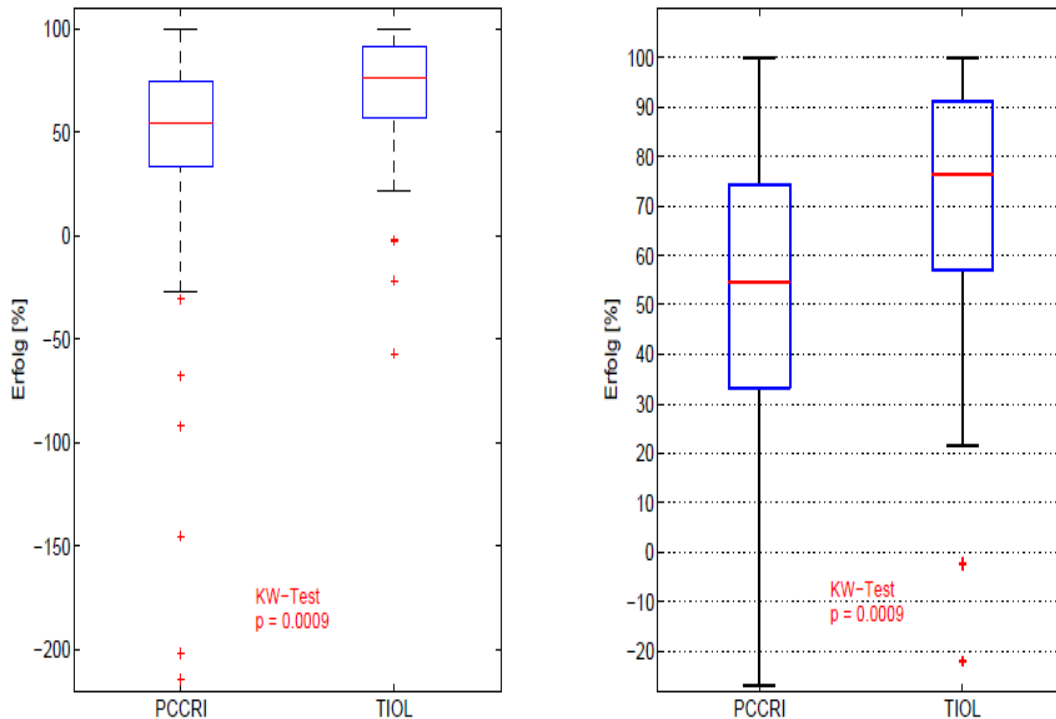


**Abbildung 105:** Der postoperative refraktive Astigmatismus, Gruppe I und Gruppe II

Unterstellt, das Signifikanzniveau  $\alpha$  läge bei 0,05, wäre die obere Abbildung dahingehend zu interpretieren, dass postoperativ der refraktive Astigmatismus der Gruppe II statistisch signifikant kleiner als in Gruppe I ist (KW-Test 0,0022). Nach der  $\alpha$ -Adjustierung nach Bonferroni ( $\alpha < 0,0017$ ) kann jedoch keine sichere statistische Signifikanz nachgewiesen werden. Weitere Vergleiche, welche im Verlauf dieser Studie präsentiert werden, bestätigen, dass die Implantation von torischen Intraokularlinsen im Vergleich zu den PCCRI für die Astigmatismuskorrektur im Rahmen der modernen Kataraktchirurgie effektiver ist.

#### 4.4.4 Erfolg der Operation

Der absolute Erfolg der Operation für beide o. g. Methoden wird in folgendem Diagramm aufgezeigt:



**Abbildung 106:** Statistischer Vergleich des prozentualen Erfolgs der Astigmatismusreduktion zwischen Gruppe I und II, Daten der refraktiven Auswertung

Auf der linken Seite wird das gesamte Diagramm einschließlich der Grenzwerte dargestellt. Im rechten Diagramm werden die stark abweichenden Werte ignoriert, somit wird es auf den wichtigsten Teil des Diagramms abgestellt, sodass der Unterschied der Effektivität der zwei Methoden deutlicher hervorgehoben wird. Es liegt ein statistisch signifikanter Unterschied zwischen PCCRI (Median 54,6 %) und TIOL (76 %) ( $p = 0,0009$ ) mit einer deutlichen Überlegenheit für die Implantation von torischen Intraokularlinsen bezüglich der Effektivität der refraktiven Reduktion des bestehenden Astigmatismus vor.

#### **4.4.5 Bewertung der Astigmatismuskorrektur durch TIOL und PCCRI**

Die statistische Auswertung der Ergebnisse dieser Studie beweist, dass die Implantation von torischen Intraokularlinsen nach Phakoemulsifikation eindeutig effektiver als Methode zur Astigmatismuskorrektur im Rahmen der modernen Kataraktchirurgie im Vergleich zu der Durchführung von PCCRI ist. Gleichwohl werden weiterhin beide Methoden zur Astigmatismusreduktion angewandt.

Der Grund, weshalb die PCCRI weiterhin zur Astigmatismuskorrektur zum Einsatz kommt, liegt an deren essentiellen Vorteilen. Für die Durchführung der PCCRI sind nur wenige zusätzliche Instrumente erforderlich. Es sind keine besonderen Änderungen an der operativen Strategie und an der postoperativen Behandlung nötig. Die Inzisionen beeinträchtigen nicht das Operationsfeld und auch die IOL-Berechnung wird durch die Inzisionen nicht beeinflusst. Die PCCRI stellen eine schnelle, einfache, sichere und kostengünstige Methode zur Astigmatismusreduktion dar. Die Inzisionen können am Tag der Operation relativ einfach berechnet und durchgeführt werden. Das bietet zusätzliche Flexibilität, da keine Wartezeiten, wie unter Umständen bei der Bestellung individuell berechneter torischer Intraokularlinsen, erforderlich werden.

Im Gegensatz dazu setzt die Implantation einer torischen Intraokularlinse zur Astigmatismuskorrektur, insbesondere bei Vorliegen eines höheren Astigmatismus, eine spezielle präoperative Planung voraus. Die benötigte Stärke der torischen Intraokularlinse wird individuell berechnet. Je nach Verfügbarkeit der benötigten Stärke muss die Linse unter Umständen bei dem Hersteller bestellt werden. Bis die Linse in dem Operationsraum zur Verfügung steht, kann ein längerer Zeitraum (besonders bei individuell angefertigten Linsen) vergehen.

Natürlich kann nach einer erfolgreichen Implantation torischer Intraokularlinsen eine Brillenunabhängigkeit oder eine Abschwächung des benötigten zylindrischen Anteils erreicht werden und die zusätzlichen Kosten für die Implantation von torischen Intraokularlinsen können teilweise ausgegli-



chen werden. Die Kosten bleiben trotzdem ein wichtiger Faktor, welcher die Entscheidung eines Patienten vor einer Kataraktoperation bezüglich der Durchführung von PCCRI oder der Implantation torischer Intraokularlinsen beeinflussen kann.

#### 4.4.6 Anwendungsbereiche PCCRI, TIOL

Beide astigmatismuskorrigierende Methoden werden heutzutage täglich angewandt. Neben den Kosten, die auf den Patienten zukommen, und dem notwendigen Instrumentarium für die Durchführung der PCCRI bzw. die TIOL-Implantation, spielt der Betrag des zu korrigierenden präoperativen Astigmatismus eine wichtige Rolle bei der Entscheidung, welche Methode zur Korrektur herangezogen wird. Hinsichtlich des eben genannten Betrags zeigt sich eine Tendenz zur Anwendung von torischen Intraokularlinsen. Aktuell scheint die Anwendung von PCCRI bei präoperativen Astigmatismuswerten von bis zu ca. 1,5 Dpt eine einfache, schnelle, sichere, günstige und operateurunabhängige Korrektur darzustellen. Zur Korrektur eines mehr als 1,5 Dpt bestehenden präoperativen Astigmatismus sind sich zahlreiche Autoren [155][Kohnen et al, 2009], [179][Amesbury et al, 2009] einig, dass die Anwendung von torischen Intraokularlinsen vorzuziehen ist. Die gleiche Auffassung zur Behandlung des präoperativen Astigmatismus im Rahmen der Kataraktchirurgie wird in unserer Klinik vertreten. Die Ergebnisse dieser Studie sowie die durch jährlich über 2000 Katarakteingriffe bedingte Erfahrung prägten folgendes Vorgehen: Bei präoperativem Astigmatismus von 1,5 Dpt bis maximal 2,0 Dpt wird während der Kataraktoperation eine Astigmatismuskorrektur durch PCCRI oder Implantation von TIOL durchgeführt, wobei Letztere favorisiert wird. Bei präoperativem Astigmatismus von über 2,0 Dpt wird dem Patienten die Implantation einer TIOL nahegelegt. Sie ist heutzutage eine sichere, vorhersagbare und effektive Methode zur Korrektur eines höheren präoperativen Astigmatismus. Die Entwicklung technisch optimierter Linsenmodelle erlaubt eine hohe postoperative endokapsuläre Stabilität der Implantate. Eine postoperative Rotation zur Korrektur der Achse der implantierten torischen Intraokularlinse scheint mittlerweile selten notwendig zu sein.

## 5. Zusammenfassung

Diese Studie hat zwei häufig angewandte Methoden zur Astigmatismusreduktion im Rahmen der modernen Kataraktchirurgie untersucht. Beide Methoden, die Durchführung von Peripheren Clear-Cornea-Relaxationsinzisionen (PCCRI) und die Implantation von torischen Intraokularlinsen, bleiben aktuell aus unterschiedlichen Gründen besonders häufig im Ansatz.

Bei der Untersuchung der PCCRI in der Form, wie sie in unserer Klinik durchgeführt werden, konnte ein im zeitlichen Verlauf stabiler astigmatismusreduzierender Effekt in den ersten sechs postoperativen Monaten nachgewiesen werden. Der mittlere refraktive Astigmatismus betrug präoperativ  $2,41 \pm 1,26$  Dpt, der entsprechende postoperative Astigmatismus  $1,08 \pm 0,8$  Dpt. Es kam zu einer mittleren Reduktion der Größe des bestehenden refraktiven Astigmatismus um  $1,33 \pm 1,08$  Dpt. Die PCCRI sind also eine sichere Methode zur Astigmatismuskorrektur; jedoch ist die Effektivität der Methode nicht sehr hoch. Gleichzeitig stellen die PCCRI eine kostengünstige Methode verbunden mit einem kleineren präoperativen Aufwand dar, welche im Rahmen der Kataraktoperation einfach durchgeführt werden kann. Die Anwendung von PCCRI ist zur Korrektur eines regulären präoperativen Astigmatismus von bis maximal 2,0 Dpt empfohlen. Durch den Einsatz des Femtosekundenlasers in der modernen Kataraktchirurgie und die Möglichkeit, damit intrastromale Hornhautinzisionen durchzuführen, können die Ergebnisse der Astigmatismuskorrektur mit Hornhautinzisionen optimiert werden.

Bei der Astigmatismuskorrektur mit TIOL betrug der mittlere refraktive präoperative Astigmatismus  $2,96 \pm 1,65$  Dpt, der entsprechende postoperative Astigmatismus  $0,70 \pm 0,55$  Dpt. Es kam zu einer mittleren Reduktion der Größe des vorliegenden refraktiven Astigmatismus um  $2,26 \pm 1,57$  Dpt. Die Astigmatismuskorrektur mit TIOL ist eine sichere Methode; ihre Effektivität ist der PCCRI zudem deutlich überlegen. Die Behandlung mit TIOL ist gegebenenfalls mit zusätzlichen Kosten für den Patienten verbunden und setzt eine präoperative Markierung der Hornhaut voraus. Neue Systeme, welche eine

präoperative digitale Markierung der Augenoberfläche und eine intraoperative Projektion dieser Markierung auf das Operationsmikroskop (Eye-Tracking) ermöglichen, sowie der Einsatz des Femtosekundenlasers zur exakten Durchführung und Positionierung der Kapsulorhexis, versprechen eine Optimierung der Ergebnisse der Astigmatismuskorrektur mit TIOL.

Für die Zukunft wird eine präzisere Planung der Zielrefraktion und eine individuelle Bestimmung des Ziel-Restastigmatismus im Rahmen der modernen Kataraktchirurgie angestrebt. Die Analyse der biomechanischen Eigenschaften der Hornhaut in vivo und viele andere technologische Fortschritte unterstützen die chirurgische Hand, sodass mit Sicherheit die Astigmatismusreduktion im Rahmen der modernen Kataraktchirurgie weitere Fortschritte zu Diensten einer exakteren refraktiven Korrektur erleben wird.

## 6. Literaturverzeichnis

- [1] World Health Organisation, "Global Data on Visual Impairments 2010," 2012.
- [2] "National Health Statistics Reports," 11. überarbeitete Auflage S. 21, Abbildung 8, Jan 2009.
- [3] *Deutsches Ärzteblatt*, Aufl. 49, S. A2468, Dez. 2012 Jg. 109.
- [4] Hoffer K., "Biometry of 7.500 cataractous eyes," *Am J Ophthalmol.*, Nr. 90(3), S. 360-368, 1980.
- [5] Pfister R., "The normal surface of corneal epithelium: A scanning electron microscopic study," *Invest. Ophthalmol.*, Aufl. 12, S. 654-668, 1973.
- [6] Mimura T., Yamagami S., Amano S., "Corneal endothelial regeneration and tissue engineering.," *Prog Retin Eye Res*, Aufl. 35, S. 1-17, Jul 2013.
- [7] Krachmer J. MD Professor, Mannis M. MD FACS, Holland E. MD, "Cornea," in *2. Aufl. 2005, S.11-16.*
- [8] Otori T., "Electrolyte content of the rabbit corneal stroma," *Exp Eye. Res*, Aufl. 6, S. 356-367, 1967.
- [9] Patel S., McLaren J., Hodge D. Bourne W., "Normal human keratocyte density and corneal thickness measurement by using confocal microscopy in vivo.," *Invest Ophthalmol Vis Sci*, Aufl. 42, Nr. 2, S. 333-9, Feb 2001.
- [10] Birk D., Fitch J., Linsenmayer T., "Organization of collagen type I and V in the embryonic chicken cornea," *Invest Ophthalmol Vis Sci*, Aufl. 27, S. 1470-1477, 1986.
- [11] Yue B., Sugar J., Schrode K., "Collagen staining in corneal tissues," *Curr Eye Res.*, Aufl. 5, S. 559-564, 1986.
- [12] Kern P., Menasche M., Robert L., "Relative rates of biosynthesis of collagen type I, type V and type VI in calf cornea," *Biochem J*, Aufl. 274, S. 615–617, 1991.
- [13] Giraud J., Pouliquen Y., Offret G. et al, "Statistical morphometric studies in normal human and rabbit corneal stroma," *Exp Eye Res*, Aufl. 21, S. 221-229, 1975.
- [14] Hamada R., Pouliquen Y. and Giranud J. et al, "Quantitative analysis on the ultrastructure of human fetal cornea," *Jpn J Ophthalmol., Tokyo*, S. 49-62, 1976.

- [15] Seiler T., *Refraktive Chirurgie der Hornhaut.*, 2000, S.19-23, 25-26.
- [16] Komai Y., Ushiki T., "The three-dimensional organization of collagen fibrils in the human cornea and sclera," *Invest Ophthalmol Vis Sci*, Aufl. 32, S. 2244-2258, 1991.
- [17] Jahadi Hosseini H., Katbab A., Khalili M., Abtahi M., "Comparison of corneal thickness measurements using Galilei, HR Pentacam, and ultrasound," *Cornea*, Aufl. 10, S. 1091–1095, Oct 2010.
- [18] Fitch J., Birk D., Linsenmayer C., Linsenmayer T., "The spatial organization of Descemet's membrane-associated type IV collagen in the avian cornea," *J Cell Biol*, Aufl. 110, S. 1457-1468, 1990.
- [19] Fujikawa L., Foster C., Harrist T., Lanigan J. and Colvin R., "Fibronectin in healing rabbit corneal wounds," *Lab Invest.*, Aufl. 45, S. 120, 1981.
- [20] Dua H., Faraj L., Said D., Gray T. Lowe J., "Ophthalmology," "*Human corneal anatomy redefined: a novel pre-Descemet's layer (Dua's layer)*", Aufl. 120, Nr. 9, S. 1778–85, Sep 2013.
- [21] McKee H., Irion L., Carley F., Brahma A., Jafarinasab M., Rahmati-Kamel M., Kanavi M. Feizi S., "Re: Dua et al.: Human corneal anatomy redefined: a novel pre-Descemet layer (Dua's layer) (Ophthalmology 2013;120:1778-85).," *Ophthalmology*. 2014 May;121(5);, Aufl. 121, Nr. 5, S. e24-e25, May 2014.
- [22] Seiler T., *Refraktive Chirurgie der Hornhaut.*, 2000, Kap. 2 , S.54-62, 64.
- [23] Scott J., "'Proteoglycan - Fibrillar collagen interaction'," *Biochem. J.*, Aufl. 252, S. 313 - 323, 1988.
- [24] Jue B., Maurice D., "The mechanical properties of the rabbit and human cornea," *Journal of Biomechanics*, Aufl. 19, S. 847–853, 1986.
- [25] Park D., Perez E., Miller D., "Corneal lamellar strength as determined by thickness, position, and fibril orientation," *J Invest Ophthalmol Vis Sci*, Aufl. 36, S. 39, 1995.
- [26] Radner W., Zehetmayer M., Skorpik C., Mallinger R., "Zur Anordnung der kollagenen Lamellen beim Keratokonus," *Spektrum Augenheilkd.*, Aufl. 10, S. 156, 160, 1996.
- [27] Reichel E., Miller D., Blanco E., Mastanduno R., "The elastic modulus of the central and perilimbal bovine cornea," *Ann Ophthalmol*, Aufl. 21, S. 205–208, 1989.
- [28] Piñero D. Alcón N., "In vivo characterization of corneal biomechanics.," *J Cataract Refract Surg.*, Aufl. 40, Nr. 6, S. 870-87, Jun 2014.

- [29] Nemeth G., Hassan Z., Csutak A., Szalai E., Berta A., Modis L. Jr., "Repeatability of ocular biomechanical data measurements with a Scheimpflug-based noncontact device on normal corneas.," *J Refract Surg.*, Aufl. 29, Nr. 8, S. 558-63, Aug 2013.
- [30] Hanna K., Jouve F., Waring G. et al, "Computer simulation of arcuate keratotomy for astigmatism," *Refractive and Corneal Surgery*, Aufl. 8, S. 152–163, 1992.
- [31] Hanna K., Jouve F., Ciarlet P., "Preliminary Computer Simulation of Radial Keratotomy, in "Refractive Keratotomy for Myopia and Astigmatism", " *St Louis, Mosby Year Book*, S. 1031-1055, 1991.
- [32] Vito R., Shin J., *A finite element model of radial keratotomy surgery. In: Waring G, ed Refractive Keratotomy for Myopia and Astigmatism.*, 1991, S. 1031-1055.
- [33] Sawusch M., McDonnell P., "Computer modeling of wound gape following radial keratotomy," *Refractive Corneal Surgery*, Aufl. 8, S. 143–145, 1992.
- [34] Seiler T., *Biomechanical aspects of corneal transverse incisions. In: Cavanagh H., ed, The Cornea; Transactions of the World Congress on the Cornea III.*, 1988, S. 615–618.
- [35] Crosson C., Klyce S., Beuerman R., "Epithelial wound closure in the rabbit cornea," *Invest Ophthalmol Vis Sci*, Aufl. 27, S. 464-473, 1986.
- [36] Gipson I., Anderson R., "Actin filaments in normal and migrating corneal epithelial cells," *Invest. Ophthalmol. Vis. Sci.*, Aufl. 16, S. 161-166, 1977.
- [37] Ebato B., Friend J., Thoft R., "Comparison of limbal and peripheral human corneal epithelium in tissue culture," *Invest Ophthalmol Vis Sci*, Aufl. 29, S. 1533-1537, 1988.
- [38] Matsuda H., Smelser G., "Electron microscopy of corneal wound healing," *Exp. Eye Res*, Aufl. 16, S. 427, 1973.
- [39] Birk D., Trelstad R., "Extracellular compartments in matrix morphogenesis: collagen fibril, bundle, and lamellar formation by corneal fibroblasts," *J Cell Biol.*, Aufl. 99, Nr. 6, S. 2024–2033, Dec 1984.
- [40] Cintron C., Hassinger L., Kublin C., Cannon D., "Biochemical and ultrastructural changes in collagen during wound healing," *Ultrastruct Res*, Aufl. 65, S. 13-22, 1978.
- [41] Hassell J., Cintron C., Kublin C., Newsome D., "Proteoglycan changes during restoration of transparency in corneal scars," *Arch Biochem Biophys*, Aufl. 222, S. 362-369, 1983.

- [42] Garana R., Petroll W., Chen W. et al, "Radial keratotomy: role of myofibroblasts in corneal wound contraction," *Invest Ophthalmol Vis Sci.*, Aufl. 33, S. 3271–3282, 1992.
- [43] Fini M., Girard M., "Expression of collagenolytic/gelatinolytic metalloproteinases by normal cornea," *Invest Ophthalmol Vis Sci*, Aufl. 31, S. 1779-1799, 1990.
- [44] Tuft S. et al, "Photorefractive keratectomy: Implications of corneal wound healing," *Br J Ophthalmol*, Aufl. 77, S. 243-247, 1993.
- [45] Krachmer J. MD Professor, Mannis M. MD FACS, Holland E. MD, "Cornea," in 2. Aufl. 2005, S.120-126.
- [46] Lang G., "Augenheilkunde," in 3., vollst. überarb. Aufl. 2004, S. 475-476.
- [47] Porter J., Guirao A., Cox I., Williams D., "Monochromatic aberrations of the human eye in a large population," *J Opt Soc Am A Opt Image Sci Vis*, Aufl. 18, Nr. 8, S. 1793-803, Aug 2001.
- [48] Howland H., Sayles N., "Photokeratometric and photorefractive measurements of astigmatism in infants and young children," *Vision Res*, Aufl. 25, Nr. 1, S. 73-81, 1985.
- [49] Friling R., Weinberger D., Kremer I., Avisar R., Sirota L., Snir M., "Keratometry measurements in preterm and full term newborn infants," *Br J Ophthalmol.*, Aufl. 88, Nr. 1, S. 8-10, Jan 2004.
- [50] Howland H., Atkinson J., Braddick O., French J., "Infant astigmatism measured by photorefraction," *Science*, Aufl. 202, Nr. 4365, S. 331-3, Okt 1978.
- [51] Atkinson J., Braddick O., French J., "Infant astigmatism: its disappearance with age," *Vision Res.*, Aufl. 20, Nr. 11, S. 891–893, 1980.
- [52] Gwiazda J., Scheiman M., Mohindra I., Held R., "Astigmatism in children: Changes in axis and amount from birth to six years," *Invest Ophthalmol Vis Sci*, Aufl. 25, S. 88-92, 1984.
- [53] Satterfield D., "Prevalence and variation of astigmatism in a military population," *J Am Optom Assoc*, Aufl. 60, S. 14-8, 1989.
- [54] Fledelius H., Stubgaard M., "Changes in refraction and corneal curvature during growth and adult life," *Acta Ophthalmologica*, Aufl. 64, S. 487–491, 1986.
- [55] Tong L., Saw S., Lin Y., Chia K., Koh D., Tan D., "Incidence and progression of astigmatism in Singapore children," *Invest Ophthalmol Vis Sci*, Aufl. 45, S. 3914-3918, 2004.

- [56] Fan D., Rao S., Cheung E., Islam M., Chew S., Lam D., "Astigmatism in Chinese preschool children: Prevalence, change, and effect on refractive development," *Br J Ophthalmol*, Aufl. 88, S. 938-941, 2004.
- [57] Harvey E., Dobson V., Miller J., "Prevalence of high astigmatism, eyeglass wear and poor visual acuity among Native American grade school children," *Optom Vis Sci*, Aufl. 83, S. 206-212, 2006.
- [58] Kleinstein R., Jones L., Hullett S. et al, "Refractive error and ethnicity in children," *Arch. Ophthalmol*, Aufl. 121, Nr. 8, S. 1141-7, Aug 2003.
- [59] Vitale S., Ellwein L., Cotch M., Ferris F., Sperduto R., "Prevalence of refractive error in the United States, 1999–2004," *Arch. Ophthalmol.*, Nr. 126, S. 1111–1119, 2008.
- [60] Ninn-Pedersen K., Stenevi U., Ehinger B., "Cataract patients in a defined Swedish population 1986–1990. II. Preoperative observations.," *Acta Ophthalmol. (Copenh.)*, Nr. 72, S. 10–15, 1994.
- [61] Hoffmann P., Hütz W., "Analysis of biometry and prevalence data for corneal astigmatism in 23239 eyes," *J Cataract Refract. Surg.*, Aufl. 36, Nr. 9, S. 1479–1485, 2010.
- [62] Nichamin L., "Astigmatism control," *Ophthalmol. Clin. North Am.*, Nr. 19, S. 485–493, 2006.
- [63] Duke-Elder S., Abrams D., *Ophthalmic optics and refraction. System of ophthalmology.*, 1970, S. 274-295.
- [64] Koch M., Kohnen T., "Refractive cataract surgery," *Curr Opin Ophthalmol.*, Aufl. 10, Nr. 1, S. 10-15, Febr 1999.
- [65] Thornton S., *Radial and Astigmatic Keratotomy: The American System of Precise, Predictable Refractive Surgery.*, 1994.
- [66] Nichamin L. Management of Astigmatism at the Time of Lens-Based Surgery. [Online].  
[http://www.mastel.com/old\\_site/pdf/astigmatism/New%20Nomogram.pdf](http://www.mastel.com/old_site/pdf/astigmatism/New%20Nomogram.pdf)
- [67] Masket S., Tennen D., "Astigmatic stabilization of 3.0mm temporal clear cataract incisions," *J Cataract. Refract Surg.*, Aufl. 22, S. 1451-1455, 1996.
- [68] Kohnen T., Dick B., Jacobi K., "Comparison of the induced astigmatism after temporal clear corneal tunnel incisions of different sizes," *J Cataract Refract Surg*, Aufl. 21, S. 417-24, 1995.
- [69] Pflieger T., Skorpik C., Menapace R. et al, "Long term course of induced astigmatism after clear corneal incision cataract surgery," *J Cataract Refract*



*Surg*, Aufl. 22, S. 72–77, 1996.

- [70] Kaufmann C., Peter J., Ooi K., et al, "For The Queen Elizabeth Astigmatism Study Group. Limbal relaxing incisions versus on-axis incisions to reduce corneal astigmatism at the time of cataract surgery.," *J Cat Refract Surg*, Aufl. 31, Nr. 12, S. 2261-2265, 2005.
- [71] Lever J., Dahan E., "Opposite clear corneal incisions to correct preexisting astigmatism in cataract surgery.," *J Cat Refract Surg.*, Aufl. 26, Nr. 6, S. 803-805, 2000.
- [72] Nichamin L., "Opposite clear corneal incisions," *J Cat Refract Surg.*, Aufl. 27, Nr. 1, 2001.
- [73] Bazzazi N., Barazandeh B., Kashani M., Rasouli M., Rasouli M., "Opposite Clear Corneal Incisions versus Steep Meridian Incision Phacoemulsification for Correction of Pre-existing Astigmatism," *J Ophthalmic Vis Res.* , Aufl. 3, Nr. 2, S. 87-90, Apr 2008.
- [74] Nemeth G., Kolozsvari B., Berta A., Laszlo M., "Paired opposite clear corneal incision: time-related changes of its effect and factors on which those changes depend.," *Eur J Ophthalmol.*, Aufl. 24, Nr. 5, S. 676-81, Sep-Oct 2014.
- [75] Razmjoo H., Koosha N., Vaezi M., Rahimi B., Peyman A., "Corneal astigmatism change and wavefront aberration evaluation after cataract surgery: "Single" versus "paired opposite" clear corneal incisions.," *Adv Biomed Res.*, Aufl. 19, Nr. 3, S. 163, Aug 2014.
- [76] Khokhar S., Lohiya P., Murugiesan V., Panda A., "Corneal astigmatism correction with opposite clear corneal incisions or single clear corneal incision: comparative analysis.," *J Cataract Refract Surg.*, Aufl. 32, Nr. 9, S. 1432-7, Sep 2006.
- [77] Miller K., "Reducing pre-existing astigmatism with limbal relaxing incisions," in *A Complete Guide for Correcting Astigmatism: An Ophthalmic Manifesto.*, 2003, S. 107.
- [78] Olson R., "Minimizing postoperativ cylinder with peripheral clear-corneal relaxing incisions," in *A Complete Guide for Correcting Astigmatism: An Ophthalmic Manifesto.*, 2003, S. 124.
- [79] Krachmer J. MD Professor, Mannis M. MD FACS, Holland E. MD, "Cornea," in *3. Aufl. 2011, S. 1899-1905.*
- [80] Osher R., "Transverse astigmatic keratotomy combined with cataract surgery," in *Contemporary Refractive Surgery-Ophthalmology Clinics of North America.* Philadelphia: W.B. Saunders, 1992, S. 717-725.

- [81] Budak K., Friedmann N., Koch D., "Limbal relaxing incisions with cataract surgery," *J Cataract Refract Surg*, Aufl. 24, Nr. 4, S. 503-508, 1998.
- [82] Krachmer J. MD Professor, Mannis M. MD FACS, Holland E. MD, "Cornea," in *2. Aufl. 2005, S. 2020-2026*.
- [83] Rowsey J., Fouraker B., "Corneal coupling principles," *Int Ophthalmol Clin*, Aufl. 36, Nr. 4, S. 29–38, 1996.
- [84] Thornton S., "Astigmatic keratotomy with cataract extraction," in *Small-incision cataract surgery: Foldable lenses, One-Stitch Surgery, Sutureless Surgery, Astigmatic Keratotomy.*, 1990, S. 245-258.
- [85] Nichamin L., "Management of astigmatism in conjunction with clear corneal phako surgery," in *A Complete Guide for Correcting Astigmatism: An Ophthalmic Manifesto.*, 2003, S. 42.
- [86] Thornton S., "Theory behind corneal relaxing incision/Thornton nomogram," in *Sutureless cataract surgery.*, 1992, S. 123-144.
- [87] Novis C., "Astigmatism and toric intraocular lenses," *Curr Opin Ophthalmol.*, Aufl. 11, Nr. 1, S. 47-50, Feb 2000.
- [88] Porter I., Cohen K., "Against-the-rule astigmatism associated with pseudophakic pseudoaccommodation," in *WOC-World Ophthalmology Congress, Hong Kong, 2008, S. 22*.
- [89] Verzella F., Calossi A., "Multifocal effect of against-the-rule myopic astigmatism in pseudophakic eyes," *Refract Corneal Surg.*, Aufl. 9, S. 58-61, Jan-Feb 1993.
- [90] Trindade F., Oliveira A., Frasso M., "Benefit of against-the-rule astigmatism to uncorrected near acuity," *J Cataract Refract Surg.*, Nr. 23, S. 82-85, 1997.
- [91] Gills J., *A Complete Guide for Correcting Astigmatism: An Ophthalmic Manifesto.*, 2003, S. 5.
- [92] McDonnell P., "Refractive surgery," *Br J Ophthalmol.*, Aufl. 83, S. 1257-1260, 1999.
- [93] Kohnen T., Kühne C., Cichocki M., Strenger A., "Cyclorotation of the eye in wavefront-guided LASIK using a static eyetracker with iris recognition.," *Ophthalmologe*, Aufl. 104, Nr. 1, S. 60-5, Jan 2007.
- [94] Swami A., Steinert R., Osborne W., "Rotational malposition during laser in situ keratomileusis," *Am J Ophthalmol.*, Aufl. 113, S. 561-562, 2002.
- [95] Duke-Elder S., Abrams D., *Ophthalmic optics and refraction. System of Ophthalmology.*, 1970, S. 671-674.

- [96] VERION Digital Marker Mikroskop. [Online]. <http://www.alcon-pharma.de/produkte/ophthalmochirurgie/diagnostik-und-eyetracking/verion-digital-marker-mikroskop>
- [97] Shimizu K., Misawa A., "Effects of toric IOL," in *Symposium on: Cataract, IOL, and Refractive Surgery*, San Diego, Calif, Apr, 1992.
- [98] Shimizu K., Misawa A., Suzuki Y., "Toric intraocular lenses: correcting astigmatism while controlling axis shift," *J Cataract Refract Surg*, Aufl. 20, Nr. 5, S. 523-526, 1994.
- [99] Sanders D., Grabow H., Shepherd J., "The toric IOL," in *Sutureless Cataract Surgery; An Evolution Toward Minimally Invasive Technique.*, 1992, S. 183-197.
- [100] Ruhswurm I., Scholz U., Zehetmayer M., Hanselmayer G., Skorpik C., "Astigmatism correction in cataract patients with a foldable toric intraocular lens (IOL)," *J Cataract Refract Surg*, Aufl. 26, S. 1022-1027, 2000.
- [101] Patel C., Ormonde S., Rosen P., Bron A., "Postoperative intraocular lens rotation: A randomized comparison of plate and loop haptic implants," *Ophthalmology*, Aufl. 106, S. 2190-2196, 1999.
- [102] Warlo I., Krummenauer F., Dick H., "Rotational stability in intraocular lenses with C-haptics versus Z-haptics in cataract surgery. A prospective randomised comparison. ," *Ophthalmologie*, Aufl. 102, Nr. 10, S. 987-92, Oct 2005.
- [103] Scialdone A., De Gaetano F., Monaco G., "Visual performance of 2 aspheric toric intraocular lenses: comparative study.," *J Cataract Refract Surg.*, Aufl. 39, Nr. 6, S. 906-14., Jun 2013.
- [104] Chang D., "Comparative rotational stability of single-piece open-loop acrylic and plate-haptic silicone toric intraocular lenses.," *J Cataract Refract Surg.*, Aufl. 34, Nr. 11, S. 1842-7., Nov 2008.
- [105] Ferreira T., Almeida A., "Comparison of the visual outcomes and OPD-scan results of AMO Tecnis toric and Alcon Acrysof IQ toric intraocular lenses.," *J Refract Surg.*, Aufl. 28, Nr. 8, S. 551-5, Aug 2012.
- [106] Gills J., *A Complete Guide for Correcting Astigmatism: An Ophthalmic Manifesto.*, 2003, S. 161, 173.
- [107] Shah G., Praveen M., Vasavada A., Vasavada V., Rampal G., Shastry L., "Rotational stability of a toric intraocular lens: influence of axial length and alignment in the capsular bag," *J Cataract Refract Surg.*, Aufl. 38, Nr. 1, S. 54-9, Jan 2012.
- [108] Zhu X., He W., Zhang K., Lu Y., "Factors influencing 1-year rotational stability of AcrySof Toric intraocular lenses.," *Br J Ophthalmol.*, S. 18. pii: bjophthalmol-

2015-306656. doi: 10.1136/bjophthalmol-2015-306656. [Epub ahead of print], Jun 2015.

- [109] Klamann M., Von Sonnleithner C., Gonnermann J., Maier A., Torun N., Bertelmann E., "Influence of biometric parameters on rotational stability of toric IOLs.," *Eur J Ophthalmol.*, Aufl. 23, Nr. 6, S. 836-840, Mai 2013.
- [110] Till J., Yoder P., Wilcox T., Spielman J., "Toric intraocular lens implantation: 100 consecutive cases.," *J Cataract Refract Surg.*, Aufl. 28, Nr. 2, S. 295-301, Feb 2002.
- [111] Tehrani M., Dick H., Krummenauer F., Pfirrmann G., Boyle T., Stoffelns B., "Capsule measuring ring to predict capsular bag diameter and follow its course after foldable intraocular lens implantation.," *J Cataract Refract Surg.*, Aufl. 29, Nr. 11, S. 2127-34, Nov 2003.
- [112] Torquetti L., "Toric intraocular lens rotation related to the capsulorhexis.," *J Cataract Refract Surg.*, Aufl. 41, Nr. 2, S. 483, Feb 2015.
- [113] Schwenn O., Kottler U., Krummenauer F. et al, "Effect of large positioning holes on capsule fixation of plate-haptic intraocular lenses.," *J Cataract Refract Surg.*, Nr. 26, S. 1778-85, 2000.
- [114] Gerten G., Michels A., Olmes A., "Toric intraocular lenses. Clinical results and rotational stability," *Ophthalmologie*, Aufl. 98, S. 715–720, 2001.
- [115] Gills J., *A Complete Guide for Correcting Astigmatism: An Ophthalmic Manifesto.*, 2003, S. 145.
- [116] Long D., Monica M., "A prospective evaluation of corneal curvature changes with 3.0- to 3.5-mm corneal tunnel phacoemulsification," *Ophthalmology*, Aufl. 103, S. 226–232, 1996.
- [117] Borasio E., Mehta J., Maurino V., "Surgically induced astigmatism after phacoemulsification in eyes with mild to moderate corneal astigmatism: temporal versus on-axis clear corneal incisions," *J Cataract Refract Surg*, Aufl. 32, S. 565–572, 2006.
- [118] Masket S., Wang L., Belani S., "Induced astigmatism with 2.2- and 3.0-mm coaxial phacoemulsification incisions.," *J Refract Surg.*, Aufl. 25, Nr. 1, S. 21-4, Jan 2009.
- [119] Klamann M., Gonnermann J., Maier A., Torun N., Bertelmann E., "Smaller incision size leads to higher predictability in microcoaxial cataract surgery.," *Eur J Ophthalmol.*, Aufl. 23, Nr. 2, S. 202-7, Mar-Apr 2013.
- [120] Naeser K., "Assessment and Statistics of Surgically Induced Astigmatism," *Acta Ophthalmol. Scand.*, S. 5, 6, 24, 2008.

- [121] Alpíns N., Goggin M., "Practical Astigmatism Analysis for Refractive Outcomes in Cataract and Refractive Surgery," *Survey of ophthalmology, Refractions and Reflections*, Aufl. 49, S. 110 , Jan-Febr 2004.
- [122] Holladay J., Dudeja D., Koch D., "Evaluating and reporting astigmatism for individual and aggregate data," *J Cataract and Refract Surg*, Aufl. 24, S. 62, Jan 1998.
- [123] Alpíns N., "Astigmatism analysis by the Alpíns method," *J Cataract and Refract Surg*, Aufl. 27, S. 41,47, 2001.
- [124] Naeser K., "Assessment and Statistics of Surgically Induced Astigmatism," *Acta Ophthalmol. Scand.*, S. 21, 2008.
- [125] Holladay J., Dudeja D., Koch D., "Evaluating and reporting astigmatism for individual and aggregate data," *J Cataract and Refract Surg*, Aufl. 24, S. 57-64, Jan 1998.
- [126] Alpíns N., "Astigmatism analysis by the Alpíns method," *J Cataract and Refract Surg*, Aufl. 27, S. 33-34, 2001.
- [127] Alpíns N., Goggin M., "Practical Astigmatism Analysis for Refractive Outcomes in Cataract and Refractive Surgery," *Survey of ophthalmology, Refractions and Reflections*, Aufl. 49, S. 113-116, Jan-Febr 2004.
- [128] Alpíns N., Goggin M., "Practical Astigmatism Analysis for Refractive Outcomes in Cataract and Refractive Surgery," *Survey of ophthalmology, Refractions and Reflections*, Aufl. 49, S. 117,120, Jan-Febr 2004.
- [129] Alpíns N., "A new method of analyzing vectors for changes in astigmatism," *J Cataract and Refract Surg*, Aufl. 19, S. 532,533, 1993.
- [130] Alpíns N., "Vector analysis of astigmatism changes by flattening, steepening, and torque," *J Cataract and Refract Surg*, Aufl. 23, S. 1503-1513, 1997.
- [131] Alpíns N., Goggin M., "Practical Astigmatism Analysis for Refractive Outcomes in Cataract and Refractive Surgery," *Survey of ophthalmology, Refractions and Reflections*, Aufl. 49, S. 118,120, Jan-Febr 2004.
- [132] Holladay J., Dudeja D., Koch D., "Evaluating and reporting astigmatism for individual and aggregate data," *J Cataract and Refract Surg*, Aufl. 24, S. 59,61, Jan 1998.
- [133] Holladay J., Dudeja D., Koch D., "Evaluating and reporting astigmatism for individual and aggregate data," *J Cataract and Refract Surg*, Aufl. 24, S. 58, Jan 1998.
- [134] Naeser K., "Assessment and Statistics of Surgically Induced Astigmatism," *Acta*

*Ophthalmol. Scand.*, S. 14, 2008.

- [135] *Deutsches Ärzteblatt*, Nr. 4, S. 50-56, Jan. 2010 Jg. 107.
- [136] Handl A., *Multivariate Analysemethoden : Theorie und Praxis multivariater Verfahren unter besonderer Berücksichtigung von S-PLUS.*, 2002.
- [137] Carvalho MJ, Suzuki SH, Freitas LL, Branco BC, Schor P Lima AL, "Limbal relaxing incisions to correct corneal astigmatism during phacoemulsification," *J Refract Surg.*, Aufl. 23, Nr. 5, S. 499-504, Mai 2007.
- [138] Wang Li, Misra M., Koch D., "Peripheral corneal relaxing incisions combined with cataract surgery," *J Cataract Refract Surg.*, Aufl. 29, Nr. 4, S. 712-22, Apr 2003.
- [139] Silva E., Trindade F., "Surgical correction of astigmatism during cataract surgery," *Arq Bras Oftalmol.*, Aufl. 70, Nr. 4, S. 609-14, Jul-Aug 2007.
- [140] Bradley MJ, Coombs J, Olson RJ, "Analysis of an approach to astigmatism correction during cataract surgery," *Ophthalmologica*, Aufl. 220, Nr. 5, S. 311-6, Mai 2006.
- [141] Arraes J., Cunha F., Arraes T., Cavalvanti R., Ventura M., "Limbal relaxing incisions during cataract surgery: one-year follow-up," *Arq Bras Oftalmol.*, Aufl. 69, Nr. 3, S. 361-4, Mai-Jun 2006.
- [142] Geggel H., "Arcuate relaxing incisions guided by corneal topography for postkeratoplasty astigmatism: vector and topographic analysis," *Cornea*, Aufl. 25, Nr. 5, S. 545-57, Jun 2006.
- [143] Kim D., Wee W., Lee J., Kim M., "The short term effects of a single limbal relaxing incision combined with clear corneal incision," *Korean J Ophthalmol.*, Aufl. 24, Nr. 2, S. 78-82, Apr 2010.
- [144] Bayramlar H., Dağlıoğlu M., Borazan M., "Limbal relaxing incisions for primary mixed astigmatism and mixed astigmatism after cataract surgery," *J Cataract Refract Surg.*, Aufl. 29, Nr. 4, S. 723-8, Apr 2003.
- [145] Alpíns N., "Astigmatism Analysis by the Alpíns method," *J Cataract Refract Surg*, Aufl. 27, Nr. 1, S. 49, Jan 2001.
- [146] Carey P., Leccisotti A., McGilligan V., Goodall E., Moore C., "Assessment of toric intraocular lens alignment by a refractive power/corneal analyzer system and slitlamp observation," *J Cataract Refract Surg.*, Aufl. 36, Nr. 2, S. 222-9, Feb 2010.
- [147] Rozema J., Gobin L., Verbruggen K., Tassignon M., "Changes in rotation after implantation of a bag-in-the-lens intraocular lens," *J Cataract Refract Surg.*

Aufl. 35, Nr. 8, S. 1385-8, Aug 2009.

- [148] Ernest P., Potvin R., "Effects of preoperative corneal astigmatism orientation on results with a low-cylinder-power toric intraocular lens," *J Cataract Refract Surg.*, Aufl. 37, Nr. 4, S. 727-32, Apr 2011.
- [149] Zuberbuhler B., Signer T., Gale R., Haefliger E., "Rotational stability of the AcrySof SA60TT toric intraocular lenses: a cohort study," *BMC Ophthalmol.*, Aufl. 6, Nr. 5, S. 8, Mai 2008.
- [150] Giansanti F., Rapizzi E., Virgili G., Mencucci R., Bini A., Vannozzi L., Menchini U., "Clear corneal incision of 2.75 mm for cataract surgery induces little change of astigmatism in eyes with low preoperative corneal cylinder," *Eur J Ophthalmol.*, Aufl. 16, Nr. 3, S. 3, Mai-Jun 2006.
- [151] Tejedor J., Pérez-Rodríguez J., "Astigmatic change induced by 2.8-mm corneal incisions for cataract surgery.," *Invest Ophthalmol Vis Sci.*, Aufl. 50, Nr. 3, S. 989-94, Mar 2009.
- [152] Roman S., Auclin F., Baudouin C., "Limbal relaxing incisions to correct preexisting astigmatism during cataract surgery," *Fr Ophthalmol.*, Aufl. 32, Nr. 6, S. 390-5, Jun 2009.
- [153] Shen Y., Tong J., Li Y., "Corneal relaxing incision combined with phacoemulsification and IOL implantation," *J Zhejiang Univ Sci.*, Aufl. 5, Nr. 8, S. 985-8, Aug 2004.
- [154] Müller-Jensen K., Fischer P., Tan M., "Para-limbal relaxing incisions for reduction of astigmatism within the scope of cataract surgery," *Klin Monbl Augenheilkd.*, Aufl. 217, Nr. 5, S. 257-62, Nov 2000.
- [155] Kohlen T., Klaproth O., "Correction of astigmatism during cataract surgery," *Klin Monbl Augenheilkd.*, Aufl. 226, Nr. 8, S. 596-604, Aug 2009.
- [156] Alpíns N., "Astigmatism analysis by the Alpíns method," *J Cataract and Refract Surg*, Aufl. 27, S. 31,49, 2001.
- [157] Naeser K., "Assessment and Statistics of Surgically Induced Astigmatism," *Acta Ophthalmol. Scand.*, S. 18-19, 2008.
- [158] Alpíns N., "Vector analysis of astigmatism changes by flattening, steepening, and torque," *J Cataract and Refract Surg*, Aufl. 23, S. 1512,1513, 1997.
- [159] Alpíns N., "Personalized nomograms "essential", surgeons say," *Ocular surgery news*, S. 40, Apr 2006.
- [160] Alpíns N., "Astigmatism analysis by the Alpíns method," *J Cataract Refract Surg*, Aufl. 27, S. 40,44, 2001.

- [161] Gudmundsdottir E., Jonasson F., Jonsson V., Stefansson E., Sasaki H., Sasaki K., "“With the rule” astigmatism is not the rule in the elderly. Reykjavik Eye Study: a population based study of refraction and visual acuity in citizens of Reykjavik 50 years and older.Iceland-Japan Co-Working Study Groups," *Acta Ophthalmol Scand*, Nr. 78, S. 642-646, 2000.
- [162] Asano K., Nomura H., Iwano M., Ando F., Niino N., Shimokata H., Miyake Y., "Relationship between astigmatism and aging in middle-aged and elderly Japanese," *Jpn J Ophthalmol.*, Nr. 49, S. 127– 133, 2005.
- [163] Alpíns N., "A new method of analyzing vectors for changes in astigmatism," *J Cataract and Refract Surg*, Aufl. 19, S. 530, 1993.
- [164] Mingo-Botín D., Muñoz-Negrete F., Won Kim H., Morcillo-Laiz R., Rebolleda G., Oblanca N., "Comparison of toric intraocular lenses and peripheral corneal relaxing incisions to treat astigmatism during cataract surgery," *J Cataract Refract Surg.*, Aufl. 36, Nr. 10, S. 17, Oct 2010.
- [165] Bascaran L., Mendicute J., Macias-Murelaga B., Arbelaitz N., Martinez-Soroa I., "Efficacy and stability of AT TORBI 709 M toric IOL," *J Refract Surg*, Aufl. 29, Nr. 3, S. 194-9, Mar 2013.
- [166] Sheppard A., Wolffsohn J., Bhatt U., Hoffmann P., Scheider A., Hütz W., Shah S., "Clinical outcomes after implantation of a new hydrophobic acrylic toric IOL during routine cataract surgery," *J Cataract Refract Surg.*, Aufl. 39, Nr. 1, S. 41-7, Jan 2013.
- [167] Alberdi T., Macías-Murelaga B., Bascarán L., Goñi N., de Arregui S., Mendicute J., "Rotational stability and visual quality in eyes with Rayner toric intraocular lens implantation.," *J Refract Surg.*, Aufl. 28, Nr. 10, S. 696-701, Oct 2012.
- [168] Debois A., Nochez Y., Bezo C., Bellicaud D., Pisella P., "Refractive precision and objective quality of vision after toric lens implantation in cataract surgery," *J Fr Ophthalmol.*, Aufl. 35, Nr. 8, S. 580-6, Oct 2012.
- [169] Chua W., Yuen L., Chua J., Teh G., Hill W., "Matched comparison of rotational stability of 1-piece acrylic and plate-haptic silicone toric intraocular lenses in Asian eyes," *J Cataract Refract Surg.*, Aufl. 38, Nr. 4, S. 620-4, Apr 2012.
- [170] Hoffmann P., Auel S., Hütz W., "Results of higher power toric intraocular lens implantation," *J Cataract Refract Surg.*, Aufl. 37, Nr. 8, S. 1411-8, Aug 2011.
- [171] Li J., Zhao Y., Li J., Huang F., Huang H., Zheng J., "Short-term observation of Acrysof Toric intraocular lens for correction of preoperative astigmatism in patients having cataract surgery," *Zhonghua Yan Ke Za Zhi.*, Aufl. 46, Nr. 6, S. 513-7, Jun 2010.
- [172] Zarranz-Ventura J., Moreno-Montañés J., Caire Y González-Jáuregui J., de



Nova Fernández-Yáñez E., Sádaba-Echarri L., "Acrysof(®) toric intraocular lens implantation in cataract surgery," *Arch Soc Esp Oftalmol.*, Aufl. 85, Nr. 8, S. 274-7, Aug 2010.

- [173] Wolffsohn JS, Buckhurst PJ, "Objective analysis of toric intraocular lens rotation and centration," *J Cataract Refract Surg.*, Aufl. 36, Nr. 5, S. 778-82, Mai 2010.
- [174] Holland E., Lane S., Horn J., Ernest P., Arleo R., Miller K., "The AcrySof Toric intraocular lens in subjects with cataracts and corneal astigmatism: a randomized, subject-masked, parallel-group, 1-year study," *Ophthalmology*, Aufl. 117, Nr. 11, S. 2104-11, Nov 2010.
- [175] Koshy J., Nishi Y., Hirnschall N., Crnej A., Gangwani V., Maurino V., Findl O., "Rotational stability of a single-piece toric acrylic intraocular lens," *Cataract Refract Surg.*, Aufl. 36, Nr. 10, S. 1665-70, Oct 2010.
- [176] Mendicute J., Irigoyen C., Aramberri J., Ondarra A., Montés-Micó R., "Foldable toric intraocular lens for astigmatism correction in cataract patients," *J Cataract Refract Surg.*, Aufl. 34, Nr. 4, S. 601-7, Apr 2008.
- [177] Langenbucher A., Viestenz A., Szentmáry N., Viestenz A., Eppig T., Seitz B., "Correction of corneal astigmatism with toric lenses : Theory and clinical aspects," *Ophthalmologe*, Aufl. 107, Nr. 2, S. 189-201, Feb 2010.
- [178] Duller C., *Einführung in die nichtparametrische Statistik mit SAS und R: Ein Anwendungsorientiertes Lehr- und Arbeitsbuch.*: Physica, ISBN: 978-3-7908-2059-1, 2008.
- [179] Amesbury E., Miller K., "Correction of astigmatism at the time of cataract surgery," *Curr Opin Ophthalmol.*, Aufl. 20, Nr. 1, S. 19-24, Jan 2009.

## Danksagung

Herrn Professor Dr. med. Jost Hillenkamp möchte ich für die Überlassung dieser Arbeit und für die Betreuung danken.

Herrn Professor Dr. Wolfgang E. Lieb möchte ich mich für die nahe Betreuung, sowie für die fundierte, solide Lehre der konservativen und operativen Augenheilkunde im Rahmen unserer langjährigen Zusammenarbeit herzlich bedanken.

Für die selbstlose, unentwegt engagierte Unterstützung bei der statistischen Auswertung der Ergebnisse danke ich Herrn Dr. Birk Schütz.

Allen Personen, die an mich geglaubt haben und zu unterschiedlichen Zeitpunkten dieses langen Weges mich bei der Durchführung bzw. Korrektur der Arbeit unterstützt haben, besonders Herrn Dr. med. Michael Alivertis, möchte ich von Herzen danken.

Den die Studie betreffenden Patienten danke ich für ihre höfliche, respektvolle Art und ihre unkomplizierte Mitarbeit.

Für die Inspiration und die Unterstützung in jeder Hinsicht, sowie für die materielle und geistig-seelische Ausrüstung für das Leben möchte ich mich bei meinen Eltern und meiner Familie bedanken.