

Aus der Fachrichtung Augenheilkunde  
Fachbereich 4 (Klinische Medizin)  
der Universität des Saarlandes, Homburg/Saar

**WELLENFRONTANALYSE UND KONTRASTSEHEN NACH  
ASTIGMATISMUSKORREKTUR MITTELS C-CUTS**

DISSERTATION ZUR ERLANGUNG DES GRADES EINES DOKTORS DER  
MEDIZIN

der Medizinischen Fakultät des Saarlandes  
2007

vorgelegt von: Katja Liane Kremp

**(Version vom 23.10.2011 mit veränderter Paginierung.**  
- Anmerkung der Saarländischen Universitäts- und Landesbibliothek)

# INHALTSVERZEICHNIS

<b>1. Abkürzungen.....</b>	<b>4</b>
<b>2. Zusammenfassung.....</b>	<b>6</b>
2.1 Summary.....	7
<b>3. Einleitung.....</b>	<b>9</b>
<b>4. Material und Methoden.....</b>	<b>15</b>
4.1 Studienaufbau.....	15
4.2 Patientenkollektiv.....	15
4.3 Untersuchungsmethoden.....	16
4.4 OP-Technik.....	21
4.5 Statistik.....	22
<b>5. Ergebnisse.....</b>	<b>24</b>
5.1 Refraktionsänderung und Keratometrie nach Javal.....	24
5.2 Hornhauttopographie und Coupling-Effekt.....	24
5.3 Sicherheit.....	25
5.4 Effektivität.....	25
5.5 Aberrometrie.....	26
5.6 Kontrastsehen.....	29
<b>6. Diskussion.....</b>	<b>31</b>
6.1 Effektivität und Sicherheit.....	31
6.2 Coupling-Effekt.....	36
6.3 Sehqualität/Kontrastsehen und Aberration.....	37
6.4 Kombination der C-Cuts mit weiteren operativen Eingriffen.....	42
6.5 C-Cuts und Altern.....	43

6.6 Fazit für die Praxis.....	45
<b>7. Literatur.....</b>	<b>47</b>
<b>8. Publikationen/Dank.....</b>	<b>57</b>
8.1 Publikationen.....	57
8.2 Dank.....	57
<b>9. Lebenslauf.....</b>	<b>58</b>

# 1. ABKÜRZUNGEN

°	Grad
µm	Mikrometer
Abb.	Abbildung
AK	astigmatische Keratotomie
BVA	Berufsverband der Augenärzte Deutschlands
bzw.	beziehungsweise
c/deg	cycles per degree
ccm	cum correctione maxima, mit bester Korrektur
cd	candela
cyl	Zylinder
D	Dioptrien
d. h.	das heißt
Fa.	Firma
FDA	Food and Drug Administration
h	Stunde, Uhr
HOA	Higher order aberration
Inc.	Incorporation
LASEK	Laser subepithelial Keratomileusis
LASIK	Laser-in-situ-Keratomileusis
m <sup>2</sup>	Quadratmeter
mm	Millimeter
OSA	Optical Society of America
PRK	photorefraktive Keratektomie
RMS	Root mean square
sc	sine correctione, ohne Korrektur
sph	Sphäre
Tab.	Tabelle
TOA	Total order aberration
u. a.	und andere
z. B.	zum Beispiel

## 2. ZUSAMMENFASSUNG

### Hintergrund:

Die Astigmatismuskorrektur mittels limbusparallelen Hornhautinzisionen (C-Cuts) ist eine seit Jahren bewährte Technik, insbesondere zur Behandlung des angeborenen und postoperativen Astigmatismus. Während die Auswirkungen auf Sphäre und Zylinder (Coupling-Effekt) bereits eingehend untersucht wurden, sind Brechungsänderungen höherer Ordnung (Higher Order Aberration, HOA) noch unbekannt.

### Patienten und Methode:

Bei 24 Augen von 16 Patienten (Alter zwischen 23-55 Jahren) wurde wegen eines angeborenen regulären Hornhautastigmatismus eine Korrektur mittels C-Cuts mit dem Diamantmesser durchgeführt. Präoperativ und 8 Wochen postoperativ erfolgten folgende Untersuchungen: Keratometrie (Ophthalmometer nach Javal), Hornhauttopographie (Technomed C-Scan), Kontrastempfindlichkeit unter mesopischen ( $6\text{cd/m}^2$ ) und photopischen ( $43\text{cd/m}^2$ ) Bedingungen mit Hilfe der VSRC CST-1500 View in Tester Einblickbox (Ginsburg-Box; 1,5,3,6,12,18 c/deg) mit bester Brillenkorrektur sowie Aberrometrie.

### Ergebnisse:

Die vektorkorrigierte Reduktion des kornealen Astigmatismus betrug im Median 2,92 D. Die Auswertung der Wellenfrontfehler ergab eine deutliche Abnahme der Gesamtabbildungsfehler (Total-Order Aberration, TOA) um 24%, Folge der Astigmatismusreduktion, aber auch eine Zunahme der Abbildungsfehler höherer Ordnung (HOA) um 75%. Eine optische Zone von 7 mm (+65% HOA) induzierte circa 1/3 weniger HOA als eine von 6 mm (+95% HOA). Die Änderungen betreffen vor allem Wellenfrontfehler mit höherer Winkelfrequenz und höherer radialer Ordnung und beeinflussen die Sehqualität nicht entscheidend. Die sphärische Aberration wurde im Mittel um  $0,09\text{ }\mu\text{m}$  negativer, das vertikale Koma nahm um  $+0,08\text{ }\mu\text{m}$  zu. Kein Patient beklagte photische Phänomene. Das Kontrastsehen

verbesserte sich unter mesopischen und photopischen Bedingungen.

Schlussfolgerung:

C-Cuts stellen ein sicheres und effektives Verfahren zur Astigmatismuskorrektur dar. Eine optische Zone von 7mm sollte bevorzugt werden, da sie weniger HOA induziert.

## 2.1 Summary

### **Wavefrontanalysis and Contrast Sensitivity after C-Cuts for Corneal Astigmatism**

Purpose:

Correction of astigmatism with corneal arcuate incisions (C-Cuts) are safe and efficient procedures to reduce naturally occurring astigmatism as well as surgically induced astigmatism. Though the effects on sphere and cylinder (so called coupling-effect) are well known, changes in wavefront aberrations have not yet been investigated.

Patient and methods:

24 eyes of 16 patients (age between 23-55 years) with idiopathic corneal astigmatism underwent paired arcuate-keratotomy with the diamond knife. All patients had complete ophthalmologic examination before and 8 weeks after surgery including wavefrontanalysis with Hartmann-Shack Sensor (Zeiss-Meditec) and contrast sensitivity testing with the VSRC CST-1500 View in Tester under photopic and mesopic conditions.

Results:

The mean vector-corrected surgically induced reduction of astigmatism was 2,92 D. C-Cuts induced a mean negative spherical aberration (Z(4,0)) of 0,09 micrometers

and vertical coma of 0,08 micrometer (5 mm analyzed pupil diameter). Contrast sensitivity was improved significantly under photopic and mesopic conditions with best corrected glasses, though there was a significant increase of Higher-Order Aberrations (+65% for 7 mm optical zone and +95% for 6 mm). Zernike polynomial coefficients with higher angular frequencies and higher radial orders increased after C-Cuts more than Zernike modes having lower angular frequency and radial order.

Conclusions:

C-Cuts induced not only spherical and cylindrical changes but also Higher-Order Aberrations. C-Cuts with 7 mm optical zone should be preferred.

### 3. EINLEITUNG

Das Wort Astigmatismus ist dem Griechischen entlehnt: *a-* bedeutet nicht-, *stigma* = Punkt. Beim Astigmatismus handelt es sich um eine Krümmungsanomalie der brechenden Medien des Auges, bei der ein punktförmiges Objekt nicht punktförmig sondern strich- bzw. stabförmig auf der Netzhaut abgebildet wird. Es besteht Brennpunktlosigkeit, weil die Wirkung des optischen Systems nicht in allen Meridianen gleich ist.

Man unterscheidet zwischen einem regulären und einem irregulären Astigmatismus. Beim regulären Astigmatismus besteht eine ungleiche Brechkraft in zwei senkrecht aufeinanderstehenden Meridianen, die selten schräg (Astigmatismus obliquus) liegen. Wenn im vertikalen stärker als im horizontalen Meridian gebrochen wird, liegt ein Astigmatismus nach der Regel (Astigmatismus rectus, da häufiger vorkommend) vor, im entgegengesetzten Fall ein Astigmatismus gegen die Regel (Astigmatismus inversus). Hier lassen sich wiederum verschiedene Formen unterscheiden:

Beim einfachen myopen oder hyperopen Astigmatismus ist eine Achse des Auges emmetrop, die daraufstehende myop oder hyperop. Der Ausgleich kann mit einem Zylinderglas erfolgen, das nur in einer Achse bricht. Die Zylinderachse bezeichnet die nichtbrechende Richtung.

Beim zusammengesetzten myopen oder hyperopen Astigmatismus (Astigmatismus compositus myopicus oder hyperopicus) sind beide Achsen unterschiedlich stark myop oder hyperop. Der Ausgleich erfolgt mit einem sphärischen Glas, mit dem ein Meridian auf 0 korrigiert wird, der andere Meridian wird mit einem Zylinderglas korrigiert.

Beim gemischten Astigmatismus (Astigmatismus mixtus) ist eine Achse myop, die andere Achse hyperop. Der Ausgleich erfolgt ebenfalls durch die Kombination eines sphärischen Glases mit einem Zylinderglas.

Beim irregulären Astigmatismus sind Wölbung und Brechkraft der brechenden Medien unregelmäßig (z.B. durch Hornhautnarben). Daher kann kein Ausgleich mit Zylindergläsern erfolgen.



Die Hauptursache für den Astigmatismus des Auges liegt in der Hornhaut. An ihrer Vorderfläche erfolgt der Hauptanteil der Brechung des gesamten Auges mit durchschnittlich 43 D aufgrund der unterschiedlichen Brechungsindices von Luft (1,0003) und Hornhaut (1,376). Aber auch die Grenzflächen der Linse weisen häufig einen Astigmatismus auf, der wegen der geringen Unterschiede im Brechungsindex (Kammerwasser=1,336; Linse=1,385 im Innern und 1,406 in den Außenschichten), vernachlässigt werden kann. Sie erzeugen den Linsenastigmatismus, der oft den Hornhautastigmatismus nach der Regel kompensieren kann.

Im ersten Lebensjahr ist ein Astigmatismus sehr häufig, etwa 2/3 der Augen erreichen 0,75 D oder mehr, in 12-15% der Fälle 2 D oder mehr (Howland et al., 1978; Ikeda, Tremain, 1978; Haase, 1995). Es wurde jedoch beobachtet, dass dieser Durchschnittswert des Astigmatismus von über 1 D zu 0,5 D am Ende des 2. Lebensjahres absinkt. Weiterhin konnte aufgezeigt werden, dass der zum Teil über 3 D hohe Astigmatismen während der ersten Lebensmonate sich größtenteils bereits im ersten Jahr zurückbildet (Atkinson et al., 1980; Haase, 1995).

Es wird daher empfohlen während des ersten Lebensjahres bei symmetrischer Refraktion beidseits und moderaten Werten bis zu etwa 3 D zunächst abzuwarten und die Brechkraft zu kontrollieren, falls kein Strabismus vorliegt. Ein höhergradiger Astigmatismus kann jedoch zur Amblyopie führen und sollte deshalb auch korrigiert werden (Haase, 1995). Nach den Leitlinien des BVA sollte ohne nachgewiesene Amblyopie bzw. bei fehlender Visusangabe im Vorschulalter ein Astigmatismus ab 1,0 D korrigiert werden, bei nachgewiesener Amblyopie sollte ein Vollaussgleich des Astigmatismus erfolgen (BVA, 2003).

Der Astronom Sir George B. Airy benutzte wahrscheinlich als erster eine sphärozyklindrische Konkavlinse, um seinen eigenen Astigmatismus zu korrigieren. Erst nachdem der Holländer Franciscus Cornelius Donders im Jahre 1862 eine Abhandlung über zylindrische Linsen und Astigmatismus veröffentlicht hatte, waren Ophthalmologen dazu zu bewegen, diese Methode im größeren Umfang zu übernehmen (Donders, 1862).

Geringgradige Astigmatismusformen lassen sich gut mit einer Brille korrigieren, bei einem höheren Astigmatismus ist jedoch keine perfekte Korrektur mit Gläsern möglich. Bildverzerrungen treten besonders beim Blick durch den Randbereich des Brillenglases auf, die Verträglichkeit von Gleitsichtgläsern ist deutlich reduziert.

Auch bei der Herstellung von Brillengläsern spielt der Astigmatismus eine problematische Rolle. Veraltete Brillengläser wie z.B. Bikonvex- oder Bikonkavgläser erlaubten nur den Blick geradeaus, jede Neigung der Augenachse gegen die optische Achse des Glases wirkt sich als astigmatische Verzerrung aus. Auch Plankonvex- oder Plankonkavgläser konnten hier keine Abhilfe schaffen.

Erst die Herstellung von punktuell abbildenden Brillengläsern erlaubte eine praktisch vom Astigmatismus schiefer Bündel freie Abbildung in jeder Blickrichtung bis zum Rand des Glases. Diese werden auch Brillengläser günstigster Durchbiegung genannt, d.h. für jeden Brechwert oder kleinere Gruppen von Brechwerten sind andere Durchbiegungen notwendig. Aber auch diese sind vom Gläserdurchmesser sowie Objektstand abhängig: je näher das zu betrachtende Objekt und je größer der Gläserdurchmesser, desto größer ist der sogenannte Restastigmatismus, der somit durch das Glas induziert wird (Haase, 1971).

Eine bessere Alternative zur Brillenkorrektur stellt die Kontaktlinse dar. Bei Patienten mit höheren Astigmatismen kann eine weiche torische Kontaktlinse indiziert sein, wenn Anpassversuche mit einer formstabilen sphärischen Kontaktlinse kein befriedigendes Ergebnis liefern. Die Problematik formstabiler Kontaktlinsen bei höherem Astigmatismus besteht darin, dass ein stabiler und zentrierter Linsensitz oft nur schwierig zu erreichen ist. Auch können Druckstellen durch zu steilen oder zu flachen Linsensitz die Hornhaut schädigen.

Sehr oft führen auch berufliche Probleme Patienten mit höhergradigem Astigmatismus zum Augenarzt. Für einige Berufe wie beispielsweise bei der Polizei oder Berufsfeuerwehr werden als Eignungskriterien Mindestsehschärfen ohne Brillenkorrektur verlangt, die infolge eines Astigmatismus nicht erreicht werden.

Diesen Patienten kann man folglich nur durch einen operativen Eingriff helfen. Bei den Laserverfahren in der refraktiven Chirurgie gilt die Photoablation mit dem Excimerlaser (Photorefraktive Keratektomie, PRK, Laser-in-situ-Keratomileusis, LASIK, und Laser subepithelial Keratomileusis, LASEK) zur Korrektur eines Astigmatismus bis zu 3 D als wissenschaftlich anerkannt (Hütz et al., 1995; Steinkamp et al., 1999; Hütz et al., 2000; Kohnen et al., 2000; Hassaballa et al., 2003). Probleme bereiten jedoch höhergradige Astigmatismusformen, die eine hohe Abtragung erfordern. Dies kann zu Komplikationen führen wie z.B. subepitheliale

Trübungen der Hornhaut (Haze), Epithelverdickung oder postoperativer irregulärer Astigmatismus (Müller et al., 1998; Tomidokoro et al., 2001).

Ein neues Verfahren stellt die Implantation einer torischen Intraokularlinse dar. Diese kann wahlweise als phake intraokulare Kunstlinse in die Hinterkammer (Kohnen et al., 2005), als irisfixierte Vorderkammerlinse (Irisklauenlinse, Dick, Augustin, 2001; Kohnen et al., 2005), als kammerwinkelgestützte Linse (Guell et al., 2003; Kohnen et al., 2005) vor die eigene Linse oder als Hinterkammerlinse in den Kapselsack im Rahmen einer Kataraktoperation eingesetzt werden (Frohn et al., 1999; Ruhswurm et al., 2000; Quentin et al., 2001; Viestenz et al., 2004; Kohnen et al., 2005; Viestenz et al., 2005).

Jedoch können auch hier Probleme auftreten: Achsenänderung durch postoperative Drehung der Linse, Kataraktbildung (bei Implantation einer phaken Intraokularlinse), Hornhauttrübungen durch Endotheldekompensation bei zu geringem Abstand zwischen Kunstlinse und Hornhaut, photische Phänomene wie Blendempfindlichkeit und Lichthöfe, Augeninnendruckerhöhung durch Engwinkelglaukom sowie eine Endophthalmitis aufgrund des intraokularen Eingriffs. Durch die irisfixierten und kammerwinkelgestützten Intraokularlinsen kann es zusätzlich zu einer Pupillenverziehung kommen. Außerdem besteht die Gefahr eines akuten oder chronischen intraokularen Reizzustandes durch die unmittelbare Nähe zur Iris (Kohnen et al., 2005).

Entscheidend ist auch, dass durch Intraokularlinsen der korneale Astigmatismus „hornhautfern“ korrigiert wird und somit nur eine suboptimale Lösung darstellt.

Bereits Ende des 19. Jahrhunderts entwickelte Snellen ein Operationsverfahren mit Hornhautinzisionen zur Reduktion eines hohen postoperativen Astigmatismus nach Kataraktchirurgie (Snellen, 1869). In den 80er Jahren des 20. Jahrhunderts wurde dieses Verfahren durch Fyodorov wieder eingeführt (Fyodorov, 1980; Fyodorov, 1980; Fyodorov, Ivashina, 1982).

Weiterentwickelt wurde diese Technik der Hornhautinzisionen schließlich durch Thornton und Lindstrom. Sie stellt nunmehr ein einfaches, effektives und sicheres Verfahren dar. Die Inzisionen können bogenförmig oder transversal angelegt werden. Auch stehen verschiedene Nomogramme mit unterschiedlichen optischen Zonen zur Verfügung (Thornton, 1990; Thornton, 1994; Grene, Lindstrom, 1994).

Das Wirkprinzip besteht bei allen Verfahren darin, die Hornhautkrümmung in dem Meridian, in dem die Inzisionen gelegt werden, abzuflachen und in der Gegenachse aufzusteilen (Coupling-Effekt). Ideal hierfür sind die gemischten Astigmatismusformen, deren sphärisches Äquivalent bei 0 D liegt (z.B. +2,0 sph und -4,0 cyl). Es handelt sich hierbei meist um einen angeborenen Astigmatismus.

Alle diese Korrekturverfahren berücksichtigen primär nur den Astigmatismus, wobei teilweise auch die sphärische Fehlsichtigkeit mit verändert wird.

Zu bedenken ist allerdings, dass Astigmatismus sowie Myopie (Kurzsichtigkeit) und Hyperopie (Übersichtigkeit) zwar die wesentlichen Abbildungsfehler des menschlichen Auges darstellen, andere aber auch das optische System des Auges beeinflussen. Dies ist zwar bereits seit dem 19. Jahrhundert bekannt und wurde durch Helmholtz, Tscherning und Gullstrand eingehend untersucht, aber erst durch Einführung von sogenannten Aberrometern vor wenigen Jahren wurden klinische Messungen möglich (Helmholtz, 1867; Tscherning, 1894; Liang, 1994; Liang, 1997).

Den Stellenwert dieser sogenannten Aberrationen höherer Ordnung erkannte man bei Patienten nach laserchirurgischen Hornhauteingriffen wie LASIK, LASEK oder PRK. Diese beklagten sich über schlechteres Dämmerungssehen und erhöhte Blendempfindlichkeit trotz gutem Visus (Müller et al., 1998; Hugger et al., 1999; Schlote et al.; 1999; Lackner et al., 2001). Ähnliche Probleme traten nach Kataraktchirurgie und Implantation von bikonvexen Intraokularlinsen auf (Waltersdorfer et al., 1991; Auffahrt et al., 1994; Grosskopf, Eisenmann, 1997).

Diese Patienten litten offensichtlich unter einer gestörten Kontrastwahrnehmung, die sich besonders bei Objekten bzw. unter Beleuchtungsumständen mit reduziertem Kontrast bemerkbar machten (Lachenmayr, Pateras, 1987).

Die Tatsache, dass derartige Sehstörungen bei der üblichen Sehschärfepfung nicht ausreichend erfasst werden, hängt damit zusammen, dass bei den üblicherweise verwendeten Sehproben ein sehr hoher, annähernd 100-prozentiger Kontrast aus schwarzer Optotype und weißem Hintergrund besteht. Der dabei gewonnene Zahlenwert beschreibt die Sehqualität daher nur teilweise. Berücksichtigt man die Tatsache, dass 100-prozentige Kontraste wie bei der Sehschärfebestimmung in der realen Welt eher selten sind, so ist die Bestimmung der Kontrastsehschärfe, vor allem unter mesopischen Bedingungen (Dämmerungssehen), deutlich näher am physiologischen Sehakt. Durch Messungen

mit dem Aberrometer konnte gezeigt werden, dass durch laserchirurgische Hornhauteingriffe Aberrationen höherer Ordnung induziert wurden, die eine bedeutende Rolle beim Kontrastsehen spielen (Mierdel et al., 1999; Seiler et al., 2000; Moreno-Barriuso et al., 2001).

Zielsetzung der Arbeit:

Die Astigmatismuskorrektur mittels C-förmiger Hornhautinzisionen mit einer freien optischen Zone von 6 mm oder 7 mm Durchmesser ist eine seit Jahren bewährte Technik, insbesondere zur Behandlung des angeborenen oder postoperativen kornealen Astigmatismus. Während die Auswirkungen auf Sphäre und Zylinder (Coupling-Effekt) bereits eingehend untersucht wurden, ist der Einfluss auf die Aberrationen höherer Ordnung noch völlig unbekannt.

Ziel der vorliegenden Studie war es, die Veränderungen der Aberrationen höherer Ordnung nach operativer Astigmatismuskorrektur zu messen und die Auswirkungen auf das Kontrastsehen unter mesopischen (Dämmerungssehen) und photopischen (Tagessehen) Lichtbedingungen zu untersuchen. Zusätzlich bestimmten wir die Abhängigkeit dieser Parameter von der Größe der optischen Zone.

## 4. MATERIAL UND METHODEN

### 4.1 Studienaufbau

Bei dieser Untersuchung wurden prospektiv von Februar 2002 bis Februar 2003 16 Patienten in die Studie aufgenommen. Die Nachbeobachtungszeit betrug 8 Wochen im Median.

Eingeschlossen in die Studie wurden Patienten mit einem angeborenen, regulären Hornhautastigmatismus ohne Voroperationen.

Es handelte sich um eine Verlaufsbeobachtung mit Erhebung der Befunde am Tag vor der Operation und postoperativ am 1. Tag sowie nach 8 Wochen.

Folgende Untersuchungsparameter wurden zu jedem Untersuchungszeitpunkt dokumentiert: Visus ohne und mit bester Korrektur (sc, ccm), objektive Messung des Astigmatismus mittels Autorefraktion und Keratometrie, Hornhauttopographie, Aberrometrie sowie Kontrastsehschärfe unter mesopischen und photopischen Bedingungen.

### 4.2 Patientenkollektiv

Die Operation wurde an 24 Augen durchgeführt; die 16 Patienten waren im Alter zwischen 23 und 55 Jahren (Mittelwert:  $38 \pm 9,3$  Jahre, Median 38 Jahre).

Bei 7 Augen bestand ein Astigmatismus obliquus und bei 17 ein Astigmatismus rectus. Die Verteilung der verschiedenen Astigmatismusformen ist in Tabelle 1 zusammengefasst.

Astigmatismusform	Anzahl
Astigmatismus mixtus	4
Astigmatismus compositus hyperopicus	16
Astigmatismus compositus myopicus	3
Astigmatismus simplex hyperopicus	1

Tabelle 1: Verteilung der Astigmatismen

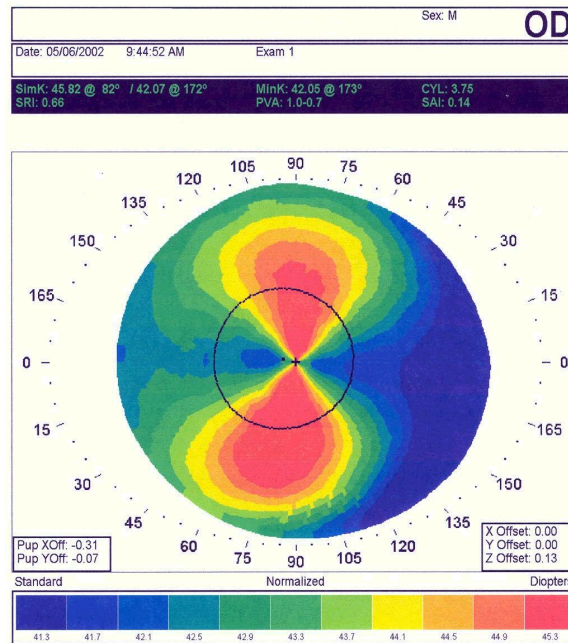
Bei 11 Patienten wurde eine optische Zone von 6 mm gewählt, bei 13 eine von 7 mm. Die Pupillenweite lag zwischen 5,2 und 7 mm. (Mittelwert  $5,8 \pm 0,61$  mm).

### **4.3 Untersuchungsmethoden**

Die Überprüfung des Fernvisus wurde unter den Bedingungen des Tagessehens (photopisches Sehen) vorgenommen. Die Testobjekte wurden hier unter Raumbelichtung und hohen Kontrastverhältnissen angeboten.

Die Hornhautbrechkraft wurde mit einem Keratometer nach Javal (Fa. Haag-Streit, Bern, Schweiz) ermittelt (Happe, 1996).

Die Hornhauttopographie erfolgte mit dem Gerät V 1.51/5/5 der Fa. Technomed, Baesweiler. Es handelt sich hierbei um ein Videotopographiesystem, das konzentrische Ringe unterschiedlicher Helligkeit und Farbe auf die Hornhaut projiziert. Die Bilder werden durch eine hochauflösende Kamera aufgenommen, rechnergestützt analysiert und in numerische Daten umgesetzt. Die Form der dargestellten Abstände der auf die Hornhaut projizierten Ringe lassen Rückschlüsse auf die Topographie der Hornhaut zu. Verglichen wird mit Kalibrierungskugeln von bekanntem Krümmungsradius. Die Hornhautoberfläche wird anschließend graphisch in Form einer farbigen Karte dargestellt, wobei jedem Hornhautbrechwert eine bestimmte Farbe zugeordnet werden kann (Förster, 1995). Ein regulärer symmetrischer Astigmatismus stellt sich hierbei in der typischen Sanduhr- oder Hantelform dar (Abb. 1).



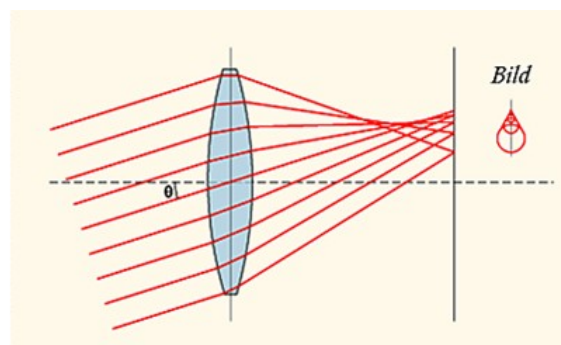
**Abb. 1: Hornhauttopographie bei kornealem Astigmatismus mit der Regel**

Die objektive Refraktion wurde mit dem Autorefraktometer R-30 (Canon Inc. Amstelveen, Netherlands) bestimmt. Somit ließen sich die bekannten Brechungsfehler wie Myopie, Hyperopie und Astigmatismus bestimmen.

Nicht bestimmt werden können hiermit Wellenfrontaberrationen höherer Ordnung wie z.B. Defokus, Koma und sphärische Aberration.

Unter Defokus versteht man die Wellenfront eines Systems, die im Vergleich zu einer idealen Wellenfront einen unterschiedlichen Krümmungsradius aufweist

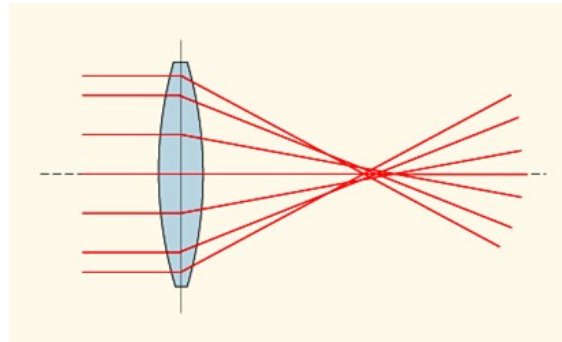
Von Koma (Abb. 2) spricht man, wenn schräg eintretende, nicht achsenparallele Lichtstrahlen durch eine Linse als kometenschweifartige Figur abgebildet werden.



**Abb. 2: Koma**

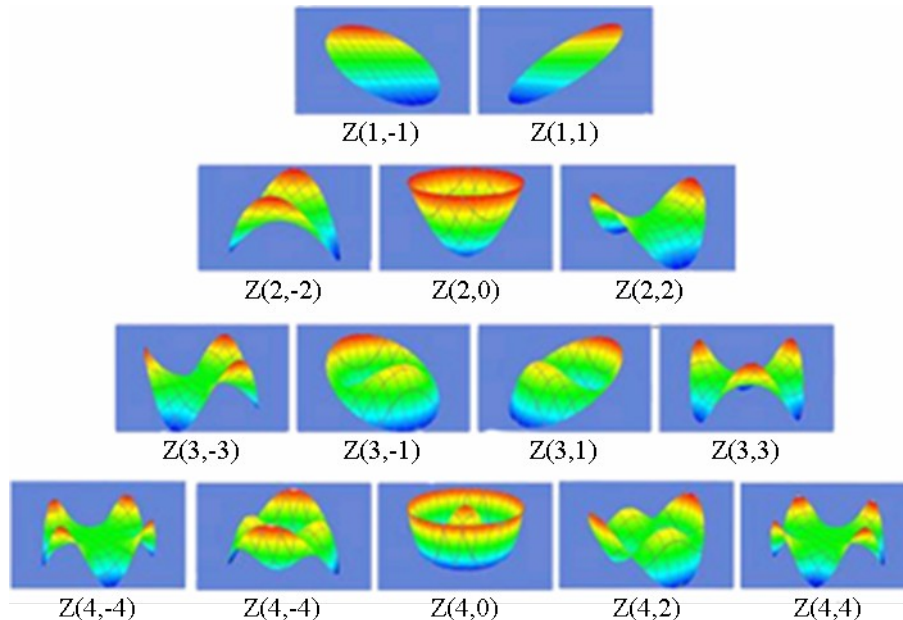


Sphärische Aberration liegt vor, wenn achsenferne Strahlen einer Wellenfront stärker als achsnahe Strahlen gebrochen werden (Abb. 3).



**Abb. 3: Sphärische Aberration**

Frits Zernike entwickelte in den 40er Jahren des 20. Jahrhunderts die Zernike-Polynome, ein Funktionensystem für die mathematische Beschreibung dieser Wellenfrontaberrationen (Abb. 4). Hierbei beschreibt jedes Polynom einen optischen Abbildungsfehler. Je höher der Ordnungsgrad der Polynome, desto komplexer die Aberration.



**Abb. 4: Zernike Polynome bis vierte Ordnung**

Die sphärische Aberration  $Z(4,0)$  zum Beispiel ist ein Polynom 4. Grades, d. h. die Funktion ist abhängig vom Pupillendurchmesser  $r^4$ . Die Potenz, mit der ein optischer Fehler

vom Pupillenradius abhängt, wird als Zernike-Ordnung bezeichnet. Somit ist die sphärische Aberration ein optischer Fehler 4. Ordnung (Mrochen, Seiler, 2001).

Diese optischen Aberrationen des Auges können seit einigen Jahren mit kommerziell erwerbbaaren Messsystemen, zu denen das Tscherning-Aberrometer (Mierdel et al., 1997; Mierdel et al., 2000; Mrochen et al., 2000), der Hartmann-Shack-Sensor (Liang et al, 1994; Pietro et al., 2000; Thibos et al., 2002), das „Ray tracing“-Aberrometer (Molebny et al., 1997; Molebny et al., 2000) und das „Spatially Resolved Refractometer“ (Webb et al., 1992; Burns, 2000) gehören, bestimmt werden.

Wir verwendeten zur Messung der Abbildungsfehler höherer Ordnung einen Hartmann-Shack-Sensor (Liang et al. 1994) der Fa. Asclepion (WASCA Wavefront-Analyzer, Fa. Asclepion Meditec, Jena, Germany, Abb. 5).



**Abb. 5: Hartmann-Shack-Wellenfront-Sensor (WASCA Wavefront-Analyzer, Fa. Asclepion Meditec)**

**Messprinzip:**

Ein Fokuspunkt wird mittels einer punktförmigen Lichtquelle auf der Netzhaut erzeugt. Nach Streuung und Reflexion am hinteren Augenpol wird die so

entstandene neue Wellenfront vom Hartmann-Shack-Sensor mittels eines Mikrolinsenarrays und einer Videokamera aufgenommen. Die optische Abweichung (Aberration) von der idealen Wellenfront wird so durch Verschiebungen in dem auf der Videokamera entstehenden Punktmuster festgestellt und berechnet (Seiler, Mrochen, 2003).

Bei jedem Auge erfolgten drei Aufnahmen unter skotopischen Bedingungen. Für jede Aufnahme wurden die RMS Wellenfront-Aberration und Zernike-Koeffizienten (Malacara Standardformat, Malacara, 1992) für eine 5-mm-Pupille bestimmt. Anschließend wurde der Mittelwert der RMS Wellenfront-Aberration und Zernike-Koeffizienten aller Aufnahmen für jedes Auge berechnet. Eine Umrechnung in die OSA-Klassifikation war mit diesem Gerät nicht möglich.

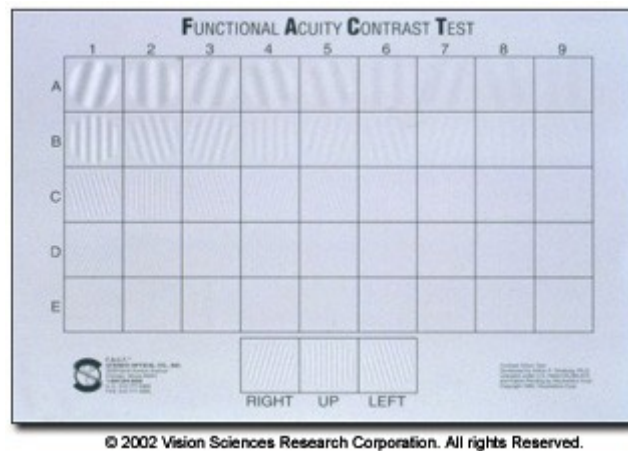
Die Überprüfung der Kontrastsehschärfe wurde mit Hilfe der VSRC CST-1500 View in Tester Einblickbox der Fa. Vision Sciences Research Corp., San Ramon, CA, USA (Ginsburg-Box, 1.5, 3, 6, 12, 18 c/deg) durchgeführt (Abb. 6).



**Abb. 6: VSRC CST-1500 Einblickbox (Vision Sciences Research Corp., San Ramon, CA, USA)**

Es erfolgten Messungen mit bester Korrektur unter mesopischen ( $6 \text{ cd/m}^2$ ) und photopischen ( $42 \text{ cd/m}^2$ ) Bedingungen. Die Patienten wurden gebeten, die Ausrichtung (gerade, nach rechts, nach links) des dargestellten Sinuswellengitters

bei unterschiedlichen Ortsfrequenzen (1.5, 3, 6, 12, 18 c/deg) und unterschiedlichen Kontraststufen anzugeben (Abb. 7).



**Abb. 7: F.A.C.T.-Sinuswellengitter-Kontrastempfindlichkeitstafel**

Die Schwelle der Kontrastempfindlichkeit bei unterschiedlicher Ortsfrequenz wurde durch das Muster mit dem niedrigsten Kontrastwert, das der Patient richtig erkannte, ermittelt.

Die Hornhautpachymetrie erfolgte mit dem auf Ultraschalltechnik basierenden Gerät Ophthasonic Pachometer (Teknar, Inc. Of St. Louis, USA, Fa. Polytech, Darmstadt). Der Messkopf sendet eine hochfrequente Impulswelle aus, die an der Hornhautvorder- und -rückfläche reflektiert wird. Ein Sensor nimmt die Echoimpulse auf und misst die zeitliche Differenz zwischen den Signalen (Draeger et al., 1995). Der Messkopf wird dabei, nach Oberflächenanästhesie, auf die Hornhaut an 9 Stellen aufgesetzt: zentral sowie im Bereich der gewählten optischen Zone bei 12h,  $\frac{1}{2}$  2h, 3h,  $\frac{1}{2}$  5h, 6h,  $\frac{1}{2}$  8h, 9h und  $\frac{1}{2}$  11h.

#### **4.4 OP-Technik**

Die OP-Technik entsprach dem von Lindstrom beschriebenen Verfahren (Greene, Lindstrom, 1994). Entscheidend war der keratometrisch bestimmte Astigmatismus, da dieser für die Berechnung von Meridian und Schnittlänge zugrunde gelegt wurde.

Die Schnitttiefe betrug, unabhängig von dem zu korrigierenden Astigmatismus, immer 95% der dünnsten, mittels Pachymetrie gemessenen Hornhautdicke.

Die Schnittlänge wurde nach dem Nomogramm nach Lindstrom (Greene, Lindstrom, 1994) ermittelt.

Die optische Zone betrug wahlweise 6 oder 7 mm in Abhängigkeit vom präoperativen Pupillendurchmesser. Betrug dieser weniger als 6 mm so wurde die optische Zone bei 6 mm festgelegt, in den anderen Fällen bei 7 mm.

Die Hornhautinzisionen erfolgten im steilsten, mittels Keratometer ermittelten Meridian.

Der Eingriff wurde in Tropfanästhesie mit Oxybuprocain (Novesine 0,4%, Fa. OmniVision GmbH, Puchheim) und nach medikamentöser Miosis (Pilo-POS 1% Augentropfen, Fa. Ursapharm, Saarbrücken) vorgenommen.

Nach Einsetzen eines Lidsperrers nach Schott wurde die optische Zone sowie der steilere Meridian auf der Hornhaut markiert. Die Hornhautinzisionen erfolgten bogenförmig (jeweils ein Paar) entlang der Markierungslinie nach der vorgegebenen Schnittlänge und der an der Mikrometerschraube eingestellten Schnitttiefe des Diamantmessers RK 1738 der Fa. Katena Products, Inc., Denville, NJ, USA (Mester, 1994,1995).

Anschließend wurden antibiotische Augentropfen (Tobramaxin, Fa. Alcon, Freiburg) appliziert und ein steriler Verband aufgeklebt.

Die Nachbehandlung erfolgte über 4 Wochen mit antibiotischen und kortisonhaltigen Augentropfen (Cibaflam, Fa. Novartis, Nürnberg) sowie mit einem Tränenersatzmittel (Artelac EDO, Fa. Dr. Gerhard Mann Pharma, Berlin oder Lacrimal ok, Fa. Pharm-Allergan, Ettlingen).

#### **4.5 Statistik**

In der Studie, bei denen die prä- und postoperativen Werte verglichen wurden, wurde der gepaarte t-Test benutzt.

Die Berechnung der Astigmatismusreduktion erfolgte mittels Vektor-Analyse nach Seiler (Seiler, Wollensak, 1993).

Die Signifikanzen der Korrelationen wurden über den Pearsonschen Korrelationskoeffizienten bestimmt. Als Signifikanzniveau wurde  $p < 0,05$  gewählt.

## 5. ERGEBNISSE

### 5.1 Refraktionsänderung und Keratometrie nach Javal

Der mittlere Betrag der Zylinderverordnung der Brille konnte von  $4,72 \pm 1,28$  D auf  $2,0 \pm 1,12$  D reduziert werden ( $p < 0,005$ ).

Der mittlere objektive Betrag der induzierten Astigmatismusänderung betrug  $2,73 \pm 1,07$  D (Median  $2,92$  D) gemessen mit dem Keratometer nach Javal (berechnet nach Seiler [Seiler, Wollensak, 1993]).

Die Höhe des postoperativen mittleren Astigmatismus, bestimmt mit dem Keratometer nach Javal, lag bei  $1,97 \pm 0,66$  ( $0,1$  bis  $3,4$  D), präoperativ lag er bei  $4,14 \pm 1,11$  ( $2,4$  bis  $6$  D). Damit konnte der Zylinderbetrag operativ um 52% im Mittel reduziert werden.

Die durchschnittliche Verdrehung der Achse des steilsten Meridians betrug 10 Grad. Das sphärische Äquivalent wurde durch den Eingriff nur gering verändert (Median  $+0,6$  D).

Das Unschärfeäquivalent, welches als Maß mit dem unkorrigierten Visus korreliert, konnte signifikant um 38% ( $1,64 \pm 1,0$  D) verbessert werden. Präoperativ betrug das Unschärfeäquivalent  $4,33 \pm 2,16$  D (von  $1,75$  bis  $9,5$  D) und postoperativ  $2,77 \pm 1,77$  D (von  $0$  bis  $6$  D).

### 5.2 Hornhauttopographie und Coupling-Effekt

Die Hornhaut wurde in der Topographie in drei optische Zonen unterteilt: zentraler Bereich von  $0-3$  mm, mittlerer Bereich von  $3-5$  mm und peripherer Bereich von  $5-7$  mm. Betrachtet man nun für jede dieser Zonen jeweils den steilsten und flachsten Meridian sowie den Mittelwert ließ sich der sogenannte Coupling-Effekt differenzierter ermitteln: es kam jeweils in der inneren und in der mittleren Zone zu einer Abflachung des steilsten Meridians sowie zu einer Aufsteilung des flachsten Meridians, wobei die Mittelwerte konstant waren. In der zentralen optischen Zone

betrug die Coupling-Ratio 1,2, im mittleren Bereich ließ sich eine Coupling-Ratio von 1,25 nachweisen: das bedeutet, dass jeweils in zentraler und mittlerer Zone die Abflachung größer als die Aufsteilung war. In der peripheren Zone zeigte sich eine Coupling-Ratio von 1,0, das heißt Aufsteilung und Abflachung waren gleich groß.

### **5.3 Sicherheit**

Bei allen Patienten mit hyperopem Astigmatismus kam es postoperativ zu einer Verbesserung der unkorrigierten Sehschärfe, da durch die Reduzierung des Astigmatismus die Hyperopie ebenfalls abnahm unter weitgehend gleichbleibendem sphärischen Äquivalent.

Lediglich bei den Patienten mit myopem Astigmatismus wurde nach der Operation sowohl eine Verbesserung als auch eine Verschlechterung der unkorrigierten Sehschärfe ermittelt. Hierfür verantwortlich war die durch die Reduzierung des Astigmatismus bedingte Zunahme der Myopie bei weitgehend gleichbleibendem sphärischen Äquivalent.

Der ermittelte Mittelwert der Sehschärfe mit Brillenkorrektur verbesserte sich um den Faktor 1,2 von 0,59 auf 0,69 ( $p < 0,05$ ). Da viele der operierten Augen amblyop waren, wurde auch bestkorrigiert meist keine volle Sehschärfe erreicht.

8 Wochen nach der Behandlung verlor kein Patient mehr als 2 Zeilen an bestkorrigiertem Visus, 22 Augen lagen im Bereich von  $\pm 1$  Zeile, 4 Augen gewannen mindestens 2 Zeilen.

### **5.4 Effektivität**

Der ermittelte Mittelwert der Sehschärfe ohne Brillenkorrektur verbesserte sich um den Faktor 2,2 von 0,18 auf 0,39 ( $p < 0,001$ ).

Am ersten postoperativen Tag und 8 Wochen postoperativ erreichten mindestens 67% der Patienten einen unkorrigierten Visus von  $\geq 0,4$ , präoperativ hatten dies lediglich 13% der Patienten erreicht. 46% der Patienten hatten postoperativ einen



Visus von  $\geq 0,5$  und 25% der Patienten sogar einen Visus von  $\geq 0,63$ , diese beiden Visusstufen wurden von keinem der Patienten präoperativ erreicht.

## 5.5 Aberrometrie

Es gibt viele weitere Ursachen für die Beeinträchtigung der Bildqualität des menschlichen Auges außer den Brechungsfehlern Sphäre und Astigmatismus (gesamte Abbildungsfehler) wie Lichtstreuung, Beugung an der Pupille, monochromatische und chromatische Aberrationen. Die monochromatischen Aberrationen, ermittelt mit dem Hartmann-Shack-Sensor, lassen sich wiederum in einfache Abbildungsfehler (Sphäre, einfacher Astigmatismus) und Aberrationen höherer Ordnung (Koma, Defokus, sekundärer Astigmatismus, sphärische Aberration, u.a.) unterteilen (Mrochen, Seiler, 2001; Applegate et al., 2002).

Bezüglich der Wellenfrontaberrationen konnten folgende Ergebnisse im prä- und postoperativen Vergleich beobachtet werden: Verringerung der gesamten Abbildungsfehler (Total Order Aberrations, TOA) um  $0,85 \mu\text{m}$  (dies entspricht 24%,  $p < 0,001$ ). Gleichzeitig nahmen die Aberrationen höherer Ordnung (Higher Order Aberrations, HOA RMS) postoperativ um  $0,18 \mu\text{m}$  (79%) zu (Tab. 2).

n=24	TOA praeoperativ	TOA postoperativ	HOA praeoperativ	HOA postoperativ
Mittelwert	3,51	2,66	0,22	0,40
Standardabweichung	1,02	1,19	0,10	0,16
Median	3,46	2,84	0,20	0,35

**Tab. 2: Änderung der TOA und HOA nach C-Cuts**

Unterscheidet man hier wiederum die verschiedenen optischen Zonen bezogen auf die Aberrationen höherer Ordnung, lässt sich für eine optische Zone von 6 mm eine Zunahme postoperativ um 94% feststellen. Bei der größeren optischen Zone von 7 mm kam es lediglich zu einer Zunahme der HOA um 66%. Somit wurde durch Inzisionen in der 7 mm optischen Zone circa 1/3 weniger HOA induziert.

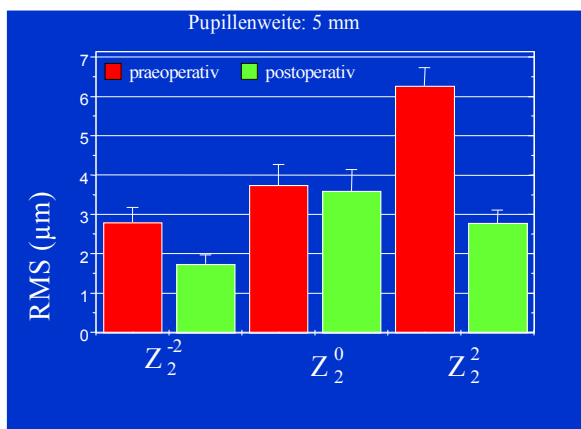
Die Reduzierung der Gesamtaberrationen unterschied sich in den beiden Gruppen nicht (Tab. 3).

	6mm optische Zone n=11		7mm optische Zone n=13	
	HOA praeoperativ	HOA postoperativ	HOA praeoperativ	HOA postoperativ
Mittelwert	0,240	0,467	0,211	0,350
Standardabweichung	0,137	0,172	0,067	0,152
Median	0,270	0,43	0,200	0,290

**Tab. 3: Änderung der HOA in von Abhängigkeit der optischen Zone**

### Wellenfrontfehler 2. Ordnung (Abb. 8)

Die Astigmatismusänderung zeigte sich in der Reduzierung der mittleren Beträge der Zernike-Polynome  $Z(2,-2)$  ( $-1,06 \pm 1,55 \mu\text{m}$ ;  $p < 0,005$ ) und  $Z(2,2)$  ( $-3,48 \pm 1,46 \mu\text{m}$ ;  $p < 0,001$ ). Der Defokus  $Z(2,0)$  änderte sich nicht.



**Abb. 8: Änderung der Wellenfrontfehler 2. Ordnung nach C-Cuts**

### Wellenfrontfehler 3. Ordnung (Abb. 9)

Durch den Eingriff wurde eine vertikale Koma ( $Z(3,-1)$ ) induziert ( $+0,08 \pm 0,178 \mu\text{m}$ ;  $p < 0,005$ ), die horizontale Koma ( $Z(3,1)$ ) reduzierte sich tendenziell. Die Trefoils zeigten stärkere Veränderungen,  $Z(3,-3)$  nahm im Mittel um  $0,36 \pm 0,31 \mu\text{m}$  ( $p < 0,001$ ) und  $Z(3,3)$  um  $0,21 \pm 0,41 \mu\text{m}$  ( $p < 0,05$ ) zu.

## Wellenfrontfehler 4. Ordnung (Abb. 9)

Der mittlere Betrag der sphärischen Aberration  $Z(4,0)$  erhöhte sich um  $0,047 \pm 0,098 \mu\text{m}$  ( $p < 0,001$ ).  $Z(4,0)$  wurde im Mittel um  $0,09 \mu\text{m}$  negativer ( $p < 0,05$ ), das entspricht dem Faktor 1,7. Zudem erhöhten sich die Quadrofoils:  $Z(4,-4)$  um  $0,28 \pm 0,37 \mu\text{m}$  ( $p < 0,001$ ) und  $Z(4,4)$  um  $0,29 \pm 0,31 \mu\text{m}$  ( $p < 0,001$ ). Der mittlere Betrag des sekundären Astigmatismus veränderte sich nicht,  $Z(4,2)$  wurde aber um  $0,26 \mu\text{m}$  negativer ( $p < 0,001$ ), d. h. um den Faktor 5,5.

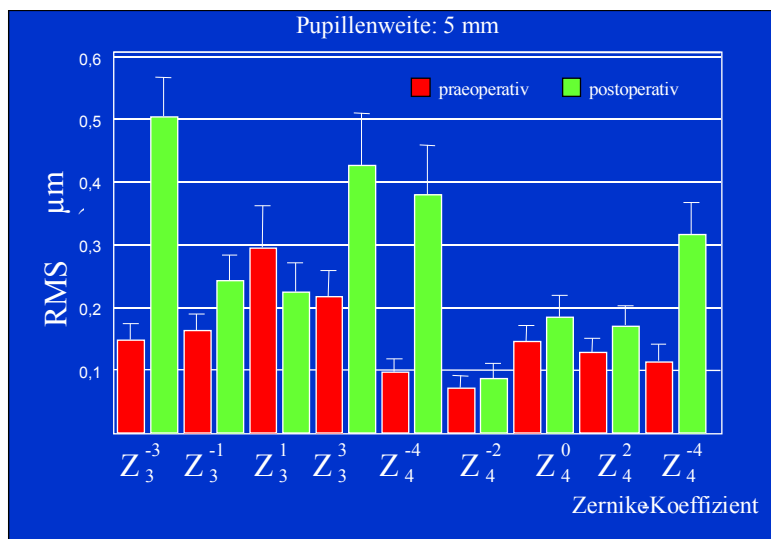


Abb. 9: Betragsänderung der Wellenfrontfehler 3. und 4. Ordnung nach C-Cuts

Betrachtet man die präoperativen Werte der Aberrationen 3. und 4. Ordnung bei den hyperopen Patienten (17 Augen, Altersmedian 40,5 Jahre), so zeigte sich, dass die Aberrationen im Median bis auf die sphärische Aberration nicht signifikant von Null abweichen. Bei der sphärischen Aberration lag der Median bei  $-0,23 \mu\text{m}$  ( $p < 0,05$ ) (Abb. 10).

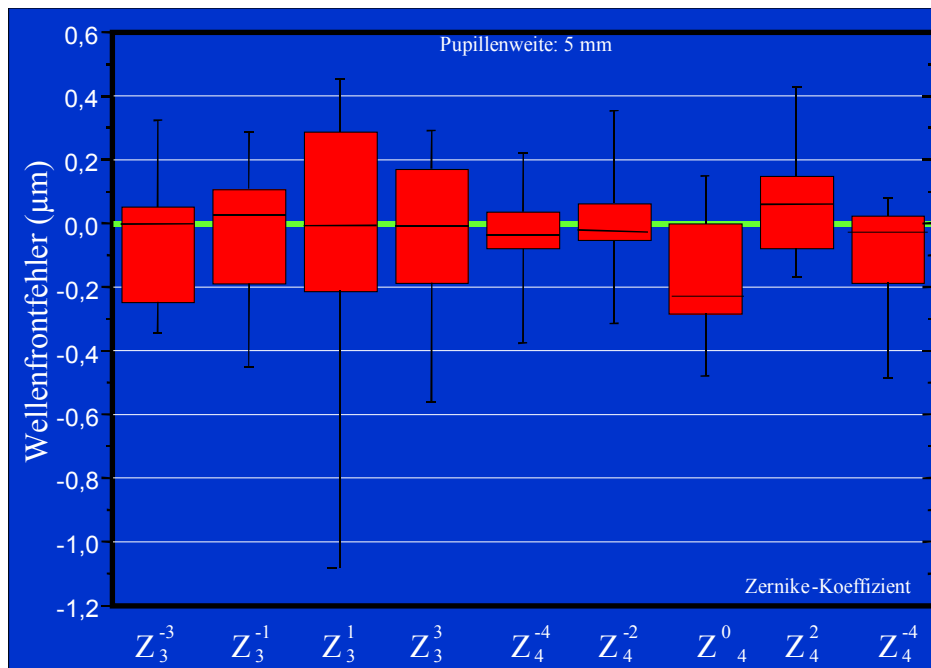


Abb. 10: Median der Wellenfrontfehler 3. und 4. Ordnung präoperativ bei 17 hyperopen Augen

## 5.6 Kontrastsehen

Die Daten der Kontrastempfindlichkeit unter photopischen und mesopischen Bedingungen sind in der Abbildung 11 dargestellt.

Betrachtet man das Kontrastsehen unter photopischen Bedingungen, so konnte eine Verbesserung des Kontrastsehens um den Faktor 1,1 bis 2,2 durch die operative Astigmatismuskorrektur erreicht werden. Der Unterschied war statistisch hoch signifikant für alle getesteten Ortsfrequenzen.

Auch das Kontrastsehen unter mesopischen Bedingungen konnte durch die bogenförmigen Hornhautschnitte zur Astigmatismuskorrektur verbessert werden. Es zeigte sich eine statistisch hoch signifikante Verbesserung für die Ortsfrequenzen 1,5, 3 und 6 c/deg. Bei Ortsfrequenz 12 c/deg kam es ebenfalls zu einem statistisch signifikanten um Faktor 1,1 bis 2,3 großen Anstieg der Kontrastsensitivität. Nur bei der höchsten Ortsfrequenz (18 c/deg) war der Unterschied nicht signifikant.

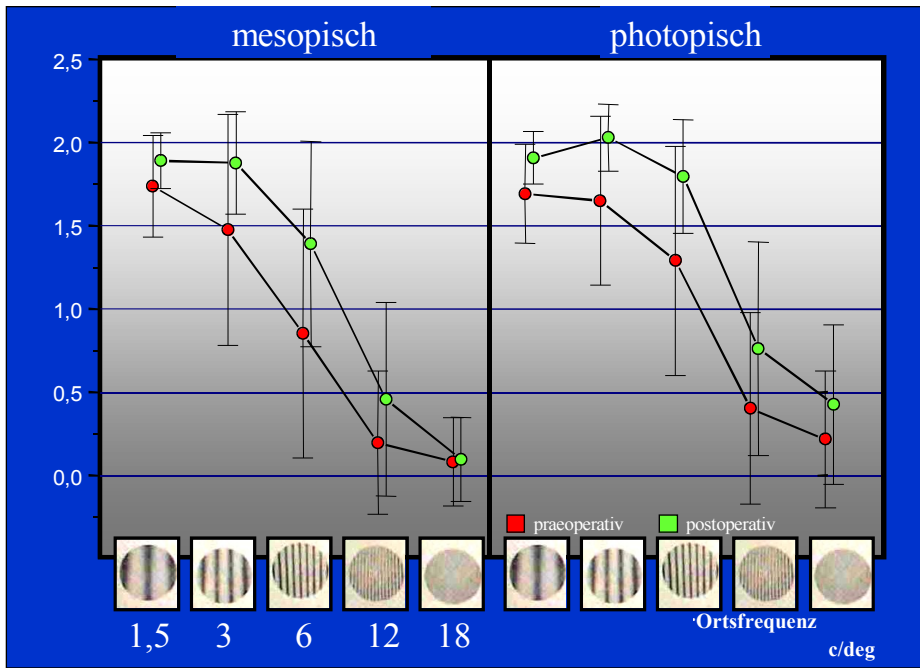


Abb. 11: Änderung der mittleren Kontrastempfindlichkeit nach C-Cuts unter mesopischen und photopischen Bedingungen

## 6. DISKUSSION

Die inzisionale Astigmatismuskorrektur ist ein seit Jahren bewährtes Verfahren, das im Gegensatz zu ablativen Korrekturverfahren auch einen hohen Hornhautastigmatismus effektiv und risikoarm korrigieren kann.

Wenig Aufmerksamkeit fanden dabei bisher die Auswirkungen auf das Kontrastsehen und die Aberrationen höherer Ordnung (Higher order aberrations, HOA) sowie der Einfluss von Pupillengröße und präoperativer sphärischer Refraktion auf das Ergebnis hinsichtlich HOA und Gesamtaberrationen (Total order aberrations, TOA).

### 6.1 Effektivität und Sicherheit

Die Effektivität eines Verfahrens ergibt sich aus dem Effektivitätsindex, der wie folgt berechnet wird: Quotient aus mittlerer postoperativer unkorrigierter Sehschärfe und mittlerer präoperativer unkorrigierter Sehschärfe (Hassaballa et al., 2003).

Betrachtet man die Verbesserung des unkorrigierten Visus bei unseren Patienten um den Faktor 2,2 sowie des Unschärfeäquivalentes, so bestätigte sich die Effektivität der Astigmatismuskorrektur mittels C-Cuts.

Trennt man die Patienten mit hyperopem Astigmatismus von denen mit myopem Astigmatismus lässt sich folgendes beobachten: Bei den Patienten mit hyperopem Astigmatismus kam es neben der Verringerung der Hornhautverkrümmung auch zu einer Verringerung der Hyperopie (bei insgesamt nahezu konstantem sphärischen Äquivalent) und somit zu einem Anstieg der unkorrigierten Sehschärfe in allen Fällen. Das operative Verfahren ist also sehr effektiv für Patienten mit hyperopem Astigmatismus.

Bei den Patienten mit myopem Astigmatismus kam es infolge der Zylinderreduktion zu einer Zunahme der Myopie (bei insgesamt konstantem sphärischen Äquivalent) und damit sowohl zu einer Verbesserung als auch zu einer Verschlechterung der unkorrigierten Sehschärfe. Man kann das Verfahren bei Anwendung bei myopem

Astigmatismus aber trotzdem als effektiv bezeichnen, da der hohe Zylinderwert in der Brille wegfällt und somit weniger Randverzeichnung entsteht und auch die Verträglichkeit von flexiblen wie von formstabilen Kontaktlinsen verbessert wird.

Während geringgradige myope Astigmatismusformen (bis zu 3 D, Drum, 2003) heute mittels photoablativer Verfahren gut korrigiert werden können, liegen für hyperope oder höhergradige Astigmatismusformen keine Empfehlungen der FDA (Food and Drug Administration) vor.

In unserer Arbeit betrug der korrigierte Astigmatismus etwa 3 D. Dieser Wert deckt sich mit anderen Publikationen (Kohnen, Strenger, 2005). Da die Indikation vor allem bei höhergradigen Astigmatismusformen zur Keratotomie gestellt wurde, war eine Unterkorrektur mittels eines Paares bogenförmiger Inzisionen oft nicht zu vermeiden. Andererseits ist eine Unterkorrektur erstrebenswerter als eine Überkorrektur, die bei unseren Patienten nicht auftrat.

Mester und Mitarbeiter beschrieben 1994 und 1995 Vorgehen und Ergebnisse zur operativen Behandlung des Astigmatismus mittels bogenförmiger tangentialer Hornhautschnitte: es kam dabei jeweils zu einem Anstieg des unkorrigierten Visus, trotz häufig vorliegender Amblyopie als Zeichen der Effektivität dieses Verfahrens.

2001 wurde von Akura und Mitarbeitern anhand von Versuchen an Schweineaugen ein Zusammenhang der Schnittlänge und auch der Schnitttiefe mit der Höhe des korrigierbaren Astigmatismus hergeleitet: je länger und je tiefer die Inzisionen, desto größer der Betrag des korrigierbaren Astigmatismus. Gleichzeitig empfehlen sie, die Inzisionen jeweils bogenförmig über  $90^\circ$  durchzuführen, da ein regulärer Astigmatismus etwa  $90^\circ$  Fläche einnimmt und somit die gesamte steilere Fläche abgeflacht und die flachere komplett aufgestellt werden kann. Hiermit soll vermieden werden, dass steilere Inseln innerhalb abgeflachter Hornhautgebiete verbleiben und somit die ideale korneale Sphärizität erhalten bleibt.

Kwitko und Mitarbeiter zeigten 1996 in einer Studie auf, dass eine bogenförmige Keratotomie eine effektive Methode ist, um einen angeborenen Astigmatismus zu korrigieren: es kam zu einer Verbesserung des unkorrigierten Visus sowie zu einer signifikanten Reduktion des Astigmatismus.

Die Sicherheit einer refraktiven operativen Methode wird bestimmt, indem man die hinzugewonnenen Zeilen der bestkorrigierten Sehschärfe postoperativ ermittelt. Der

Sicherheitsindex berechnet sich aus dem Quotienten von mittlerem postoperativen bestkorrigierten Visus und mittlerem präoperativen bestkorrigierten Visus. Daraus ergibt sich eine direkte Proportionalität: je höher der Sicherheitsindex desto höher die Sicherheit des Verfahrens (Hassaballa et al., 2003).

Wir konnten die bestkorrigierte Sehschärfe bei nahezu allen Patienten postoperativ verbessern. In keinem Fall kam es zu einem Visusabfall um mehr als zwei Visusstufen. Die Verbesserung des bestkorrigierten Visus um den Faktor 1,2 spricht somit für die Sicherheit des Verfahrens. Dies wurde auch in zahlreichen früheren Veröffentlichungen beobachtet:

Mester und Mitarbeiter konnten 1994 und 1995 bei der operativen Behandlung des Astigmatismus mittels bogenförmiger tangentialer Hornhautschnitte zeigen, dass die bestkorrigierte Sehschärfe postoperativ bei allen Augen gleich oder besser war als präoperativ. Es traten keine intra- oder postoperativen Komplikationen oder Nebenwirkungen auf. Bei den Augen mit angeborenem Astigmatismus betrug der mittlere präoperative Astigmatismus  $4,69 \pm 1,3$  D, der mittlere postoperative  $2,31 \pm 1,29$  D.

Auch Akura und Mitarbeiter stellten 2000 fest, dass es durch Hornhautinzisionen mittels eines Paares bogenförmiger, 90 Grad Länge betragender Hornhautschnitte nicht nur zu einer Reduktion des Astigmatismus sondern auch zu einer Verbesserung der unkorrigierten sowie der korrigierten Sehschärfe kam, ohne dass ernsthafte Komplikationen auftraten.

Ebenso lässt sich ein postoperativ auftretender Astigmatismus nach Kataraktchirurgie mit der beschriebenen Methode der C-förmigen Hornhautinzisionen behandeln:

Müller-Jensen und Schüler konnten 1999 im Rahmen einer Studie einen höheren präoperativen Astigmatismus senken, indem sie während der Kataraktoperation eine 4 mm lange nahtfreie Stretch-Inzision in der steilen Achse ohne zusätzliche Keratotomien durchführten und damit eine signifikante Astigmatismusreduktion erzielten.

Tsioulis und Mitarbeiter kamen nach einer im Jahr 2000 veröffentlichten Arbeit zu dem Ergebnis, dass bogenförmige Hornhautinzisionen mit einer optischen Zone von



5 mm eine effektive und sichere Methode zur Korrektur eines hohen postoperativen Astigmatismus nach extrakapsulärer Kataraktextraktion sind.

Limbale Keratotomie oder limbale relaxierende Inzisionen wurden von J.P. Gills 1994 zur Korrektur von Astigmatismen im Zusammenhang mit Kataraktchirurgie in einem Eingriff oder nacheinander (zuerst die Katarakt-Operation, dann die Astigmatismuskorrektur) beschrieben (Gills et al., 1994).

Zur Korrektur eines angeborenen Astigmatismus sowie eines induzierten Astigmatismus durch eine Kataraktoperation wendeten Bayramlar und Mitarbeiter (2003) ebenfalls limbale relaxierende Hornhautinzisionen an und kamen zu dem Ergebnis, dass diese eine einfache, sichere und effektive Methode zur Astigmatismusreduktion darstellen.

Einen hohen präoperativen Astigmatismus konnten auf diese Weise Anders und Mitarbeiter erfolgreich korrigieren, indem sie in einer 2001 veröffentlichten Studie limbale relaxierende Inzisionen in dem steilsten Meridian durchführten und dabei den Tunnelschnitt zur Phakoemulsifikation über eine der Inzisionen vornahmen.

Gills und Mitarbeiter (1994) beschreiben jedoch auch die Grenzen der limbalen relaxierenden Inzisionen: es wird angestrebt, von präoperativen Astigmatismen mit maximalen Werten bis zu 3 D etwa zwei Drittel des Ausgangswertes zu korrigieren.

Auch zur Korrektur von asymmetrischen steilen Inseln in der Hornhaut nach LASIK und lamellärer Keratoplastik wurden bogenförmige Hornhautschnitte angewandt mit dem Ergebnis, dass sich die dadurch hervorgerufenen ungewollten optischen Effekte reduzieren ließen sowie die unkorrigierte Sehschärfe verbessern ließ (Pulaski, 2002).

Eine weitere Methode der Astigmatismuskorrektur mittels Hornhautinzisionen wurde von Pham entwickelt: hier werden zunächst bogenförmige Schnitte in der Hornhautperipherie durchgeführt und anschließend von diesen ausgehend ein Tunnel mit einem abgewinkelten Diamantmesser lamellierend in Richtung Hornhautmitte präpariert. Besondere Vorteile dieses Verfahrens sind die größere Wundfläche, die eine größere Stabilität im Falle eines Traumas bietet, frühe stabile Refraktion (bereits am 8. postoperativen Tag; Pham, 1993) und ein vergleichbarer Effekt mit C-Cuts bei geringerer Schnitttiefe. Auch beeinflussen die stromalen Inzisionen nicht die postoperative Sehschärfe (Anders et al., 1997).

Nordwald und Mitarbeiter wiesen 1999 neben der Sicherheit dieses operativen Verfahrens auch seine Beständigkeit nach. Nach einer Nachbeobachtungszeit von drei Jahren waren die postoperativen Ergebnisse stabil, d. h. es kam zu keiner erneuten Zunahme des Astigmatismus. Auch konnte keine Verschlechterung des Blendvisus nach bogenförmiger lamellierender Keratotomie festgestellt werden.

Anders und Mitarbeiter untersuchten in einer prospektiven Studie 1995 die Wirkung der bogenförmigen lamellierenden Keratotomie auf einen durch vorausgegangene Kataraktoperation induzierten Astigmatismus. Es kam zu einer Verbesserung des unkorrigierten Visus sowie zu einer Verbesserung des Blendvisus.

Der von uns festgestellte mittlere vektorkorrigierte Betrag der induzierten Astigmatismusänderung von  $2,61 \pm 0,99$  D wurde auch von anderen Autoren in ähnlicher Höhe beschrieben:

Mester beschrieb 1995 die vektorkorrigierte Astigmatismusreduktion mit  $2,59 \pm 1,06$  D nach Durchführung von T-Inzisionen. In einer weiteren Arbeit (Mester et al., 1995) gab er den Betrag der vektorkorrigierten Zylinderdifferenz mit  $2,66 \pm 1,05$  D an.

Nicht immer ist in der Literatur die von uns beobachtete Achsenstabilität gegeben. Akura berichtete 2000 von einer Achsabweichung in sieben von 37 Fällen mit bogenförmigen Hornhautinzisionen von  $90^\circ$  Bogenlänge behandelten Augen (18,9%). Diese fiel jedoch nach Meinung der Autoren wenig ins Gewicht, da der postoperative Zylinder zwischen 0,5 und 1,0 D betrug.

Nordwald und Mitarbeiter (1999) strebten mittels Technik der bogenförmigen lamellierenden Keratotomie eine Unterkorrektur an, um die Umkehrung der präoperativ bestehenden Astigmatismusachse zu vermeiden. Als Ergebnis betrug die Achsenänderung im Mittel  $3,1^\circ \pm 17^\circ$ , ein Patient wies eine Achsänderung um  $45^\circ$  auf, bei keinem Patienten war eine Achsendrehung um  $90^\circ$  zu verzeichnen.

In unserer Studie betrug die durchschnittliche Verdrehung der Achse des steilsten Meridians  $10^\circ$  (von  $0^\circ$  bis  $30^\circ$ ).

Langenbacher und Mitarbeiter fanden heraus, dass bei der Implantation einer torischen Intraokularlinse bereits eine Abweichung der intendierten Achslage um  $7,5^\circ$  zu einer Wirkungsreduktion um 26% der Astigmatismuskorrektur führt. Bei  $3^\circ$  Abweichung von der angestrebten Achslage reduziert sich die Wirkung um 10% der Astigmatismuskorrektur (Langenbacher et al., 2004).

In einer anderen Studie konnte gezeigt werden, dass eine Rotation der implantierten torischen Intraokularlinse um  $11,5^\circ$  zu einem Restastigmatismus führte, der 40% des initialen Astigmatismus betrug. Eine Rotation der torischen Intraokularlinse um  $3^\circ$  ergab einem Restastigmatismus mit dem Betrag von 10% des ursprünglichen Astigmatismus (Viestenz et al., 2005).

## 6.2 Coupling-Effekt

Wie beschrieben konnten wir den mittleren präoperativen Astigmatismus von  $4,6 \pm 1,23$  D postoperativ auf  $1,54 \pm 1,8$  D senken, ohne dabei das sphärische Äquivalent signifikant zu verändern. Der Grund liegt darin, dass die Zirkumferenz der Hornhautkuppel durch die Inzisionen nicht verändert wird und die Hornhaut als elastische Kuppel weitgehend dem Gauss'schen Gesetz gehorchen kann. Dies hat zur Folge, dass es zu einer Abflachung in dem Meridian führt, in dem die Schnitte angelegt werden und gleichzeitig zu einem Aufsteilen der Hornhaut in der Gegenachse. Dieser vor allem von Thornton (1990) und Ellis (1991) sehr anschaulich dargestellte Coupling-Effekt gilt natürlich nur eingeschränkt, da es sich bei der Hornhaut um ein lebendes Gewebe handelt. Die Coupling-Ratio wird in der Literatur zwischen 1 und 1,5 angegeben, wobei eine Unterteilung in unterschiedliche Hornhautzonen bisher nicht beschrieben ist.

In unserer Arbeit zeigte sich in der äußeren (5-7 mm) Zone die Coupling-Ratio mit einem Wert von 1,0, in der mittleren Hornhautzone (3-5 mm) von 1,25 und in der inneren Zone (0-3 mm) von 1,2.

Die unterschiedliche Coupling-Ratio in den drei Hornhautzonen, die Verdrehung der Hauptachse um 10 Grad sowie Traktionskräfte durch Narbenbildung in den Schnitten ließen eine Änderung auch der Aberrationen höherer Ordnung vermuten, zumal schon gezeigt werden konnte, dass allein durch Erzeugung eines LASIK-Flaps HOA um 70% induziert werden können (Pallikaris et al., 2002).

### 6.3 Sehqualität/Kontrastsehen und Aberration

Unser besonderes Interesse galt in der vorliegenden Studie der Änderung der optischen Aberrationen, da dieses Thema in der refraktiven Chirurgie in Bezug auf die Photoablation mit dem Excimerlaser (Photorefraktive Keratektomie, PRK, Laser-in-situ-Keratomileusis, LASIK) bereits vielfach untersucht wurde, bezogen auf die Astigmatismuskorrektur mit Hornhautinzisionen bisher jedoch scheinbar vernachlässigt wurde.

Die Auswertung der Wellenfrontfehler in unserer Studie zeigte eine deutliche Abnahme der Gesamtaberrationen um 24% aber eine Zunahme der Aberrationen höherer Ordnung (HOA) um 79% nach Durchführung der Hornhautinzisionen. Eine optische Zone von 6 mm induzierte eine Zunahme der HOA um 94%, eine optische Zone von 7 mm nur eine Zunahme der HOA um 66% und somit circa 1/3 weniger. Die Abnahme der Gesamtaberration nach dem Eingriff unterschied sich für beide optische Zonen nicht.

In der Literatur wurden nach PRK und LASIK weitaus größere Dimensionen berichtet. Es sind signifikante Erhöhungen der Wellenfrontaberrationen nach refraktiver Chirurgie beschrieben; die angegebenen Faktoren variieren je nach Pupillendurchmesser zwischen 2 und 20. Je größer die Pupille desto größer sind die Aberrationen höherer Ordnung. Weiterhin wurde auch auf den direkten Zusammenhang mit dem damit verbundenen Verlust an Kontrastsehschärfe hingewiesen (Mrochen, Seiler, 2001; Viestenz et al., 2001).

In einer im Jahr 2000 veröffentlichten Arbeit konnten Seiler und Mitarbeiter nachweisen, dass es nach PRK zur Behandlung von Myopie und myopem Astigmatismus zu einer Zunahme der Aberrationen höherer Ordnung um den Faktor 17,65 kam, was statistisch hoch signifikant war. Weiterhin zeigte sich eine signifikante Korrelation mit bestkorrigierter Sehschärfe, Niedrigkontrastsehschärfe sowie Blendvisus.

Weiterhin zeigten Mrochen und Mitarbeiter (2001), dass es nach PRK mit einer optischen Zone von 6 mm und größer zu einem signifikanten Anstieg von Koma und sphärischer Aberration kam. Verantwortlich dafür zeigte sich laut dieser Studie vor allem eine subklinische Dezentrierung (weniger als 1,0 mm).

In einer anderen Arbeit (Hjortdal et al., 2002) wurde die PRK mit radiärer Keratotomie bezüglich kornealer Aberration und Aberrationen höherer Ordnung verglichen. Es zeigte sich kein statistisch signifikanter Unterschied zwischen beiden Verfahren bezogen auf die gesamten kornealen Aberrationen. Betrachtet man die Aberrationen höherer Ordnung so zeigte sich hier, dass es nach radiärer Keratotomie zu einem beinahe zweimal so großen Anstieg der Aberrationen höherer Ordnung als nach PRK kam. Jedoch zeigten sich Koma und sphärische Aberration nach PRK leicht höher als nach radiärer Keratotomie.

Viele Patienten klagten nach refraktiver Hornhautchirurgie mit dem Excimerlaser über eine schlechte Sehqualität, obwohl die mit Hochkontrast-Optotypen ermittelte Sehschärfe bei 100% lag. Diese Tatsache führte uns dazu, bei unseren Patienten prä- und postoperativ neben der herkömmlichen Prüfung der Hochkontrastsehschärfe auch eine Messung der Kontrastsehschärfe unter mesopischen und photopischen Bedingungen durchzuführen.

Die Untersuchung der Kontrastempfindlichkeit mit bester Brillenkorrektur in unserer Arbeit sollte zeigen, ob eine Verschlechterung der Sehqualität durch Veränderung der Aberrationen höherer Ordnung eintritt, wie sie nach ablativen Korrekturverfahren beschrieben wurden.

Präoperativ zeigte sich bei unseren Patienten eine verminderte Kontrastempfindlichkeit für alle Ortsfrequenzen, insbesondere für hohe, wie man sie typischerweise bei amblyopen Augen vorfindet (Kaufmann, 2003).

Postoperativ verbesserte sich die Kontrastempfindlichkeit sehr deutlich unter photopischen und mesopischen Bedingungen, vor allem für mittlere Ortsfrequenzen (bis 130%). Eine im Vergleich dazu geringere Verbesserung zeigte sich für hohe Ortsfrequenzen (18 c/deg), was sich durch den bekannten neuronal bedingten Crowding-Effekt bei Amblyopen erklären lässt. Dieser besagt, dass die Sehschärfe bei Prüfung mit Einzeloptypen besser ist als beim Lesen von Sehzeichen in einer Reihe (Kaufmann, 2003).

Lee und Mitarbeiter beschrieben 2003 in einer randomisierten Studie, in der Patientenaugen mit „normaler“ Hornhaut mit Patientenaugen verglichen wurden, die mit LASIK behandelt wurden, einen Abfall der Kontrastsensitivität nach Durchführung von LASIK. Ein Zusammenhang mit der Pupillengröße und der

Wahrnehmung von Lichthöfen oder der Blendungsempfindlichkeit konnte nicht nachgewiesen werden.

In einer weiteren Arbeit (Tomidokoro et al., 2001), in der die Kontrastempfindlichkeit nach PRK untersucht wurde, zeigte sich, dass ein irregulärer Astigmatismus nach PRK die Kontrastsehschärfe signifikant beeinflusst.

Montes-Mico und Charman (2002) untersuchten die Kontrastsehschärfe nach PRK unter mesopischen sowie photopischen Bedingungen. Es zeigte sich, dass die PRK eine signifikante Reduktion des Kontrastsehens unter mesopischen Bedingungen induzierte, ohne dass es zu einer Beeinträchtigung des Kontrastsehens unter photopischen Bedingungen kam.

Auch Schlote und Mitarbeiter (1999) konnten eine Beeinträchtigung des mesopischen Sehens nach PRK (optische Zone 5 mm) aufzeigen. Es konnte festgestellt werden, dass es postoperativ zu einer statistisch signifikanten Abnahme des Kontrastsehens, einer Zunahme der Blendempfindlichkeit und einer Abnahme der Dämmerungsehschärfe kam. Hierfür verantwortlich gemacht wurden Hornhauttrübungen und -narben, grobe Dezentrierungen und vor allem Irregularitäten der Hornhautoberfläche, die Streulichteffekte und optische Aberrationen hervorrufen. Unter Tageslichtbedingungen bei engerer Pupille werden diese Einschränkungen aufgrund von Kompensationsmechanismen (z. B. der sogenannte Stiles-Crawford-Effekt: zentral durch die Pupille eintretende Lichtstrahlen werden in stärkerem Maße verarbeitet als peripher eintretende Lichtsignale) nicht wahrgenommen (Schlote et al., 1999).

Ghaith und Mitarbeiter (1998) kamen neben der Erkenntnis, dass PRK und radiäre Keratotomie die Kontrastsehschärfe herabsetzen und vermehrte Blendempfindlichkeit verursachen, weiterhin zu dem Schluss, dass der relative Effekt auch von dem Zeitpunkt der Untersuchung nach dem operativen Eingriff und dem verwendeten Gerät zur Untersuchung abhängt.

Es wurden auch zahlreiche Arbeiten veröffentlicht, die die Kontrastsensitivität nach radiärer Keratotomie zur Behandlung von Myopie und Astigmatismus überprüften. Es wurde untersucht, ob Narben oder ein irregulärer Astigmatismus die Kontrastsehschärfe reduzieren (Rashid, Waring III, 1992). Ginsburg und Mitarbeiter stellten in einem Vergleich zwischen mit radiärer Keratotomie behandeltem Auge und nicht operiertem Auge fest, dass es postoperativ im allgemeinen zu keinem

Verlust der Kontrastsehschärfe kam. Es gab lediglich einen geringen signifikanten Unterschied in den mittleren Ortsfrequenzen. Dies war jedoch ohne klinische Bedeutung, da alle Werte innerhalb der Schwankungsbreite der Normalbevölkerung lagen. Weiterhin fanden sie, dass, wenn der Pupillendurchmesser genauso groß oder größer war als der Durchmesser der gewählten optischen Zone, es zu einem signifikanten Abfall der Kontrastsehschärfe kam (Ginsburg et al., 1990).

Wesemann fand, dass bei einem Pupillendurchmesser von weniger als 2 mm der Einfluss der Aberrationen auf die Abbildungsqualität sehr gering ist, Abbildungsfehler höherer Ordnung treten also nicht visusmindernd in Erscheinung. Bedeutsamer sind die Abbildungsfehler höherer Ordnung bei großen Pupillendurchmessern (Wesemann, 2004).

Krasnov und Mitarbeiter untersuchten die Kontrastsehschärfe nach radiärer Keratotomie mit dem Ergebnis, dass es zunächst innerhalb des ersten postoperativen Monats zu einem Abfall der Kontrastsensitivität kam. Im weiteren Verlauf zeigte sich zwischen 2,5 und 4 Monaten nach der Operation nur noch eine geringe Minderung der Kontrastsehschärfe verglichen mit der Normalbevölkerung, nach 10 bis 12 Monaten konnte kein Unterschied mehr festgestellt werden (Krasnov et al., 1988).

Atkin und Mitarbeiter verglichen wiederum mit radiärer Keratotomie behandelte Augen jeweils mit dem nicht operierten Partnerauge und stellten fest, dass Augen mit größerem Pupillendurchmesser einen größeren Verlust der Kontrastsehschärfe nach radiärer Keratotomie verzeichneten (Atkin et al., 1986).

Hemenger und Kollegen postulierten, dass der Verlust der Kontrastsensitivität nach radiärer Keratotomie durch die Veränderung der kornealen sphärischen Aberration verursacht wird (Hemenger et al., 1989).

Mrochen und Mitarbeiter untersuchten im Rahmen einer prospektiven Studie an gesunden Augen neben den optischen Aberrationen auch den Einfluss der Pupillengröße. Bei einer physiologischen Pupillenweite von im Median ca. 3,3 mm im Durchmesser hatten bereits 50%, bei einem Durchmesser von 4,5 mm hatten bereits 98% der untersuchten Augen signifikante optische Aberrationen, die zu einer Reduktion der Qualität des retinalen Bildes und zu einer Reduktion der Kontrastsehschärfe führten (Mrochen et al., 2001).

Die Verbesserung des Kontrastsehens in unserer Studie war insofern von Interesse, als gezeigt werden konnte, dass durch den Eingriff Aberrationen höherer Ordnung induziert werden. Dabei ist zu bedenken, dass nicht jeder Wellenfrontfehler die Sehqualität im gleichen Ausmaß beeinflusst (Applegate et al., 2002). Vereinfacht kann man die bisherigen Ergebnisse zur Sehqualität und Wellenfrontfehler dahingehend zusammenfassen, dass Zernike-Polynome mit höherer Winkelfrequenz und höherer radialer Ordnung die Sehqualität weniger beeinflussen als Zernike-Polynome mit niedrigerer Winkelfrequenz und niedrigerer radialer Ordnung.

In unserer Arbeit zeigten sich nur geringgradige Erhöhungen postoperativ bei den funktionell wichtigen Wellenfrontfehlern mit niedriger Winkelfrequenz und radialer Ordnung wie vertikaler Koma (Erhöhung um Faktor 1,48) und sphärischer Aberration (Erhöhung um Faktor 1,2). Die horizontale Koma reduzierte sich tendenziell. Sekundärer Astigmatismus, Trefoil sowie Quadrofoil wurden stärker induziert (Erhöhung um Faktor 1,67 bis 4,94). Weitere Untersuchungen müssen zeigen, wie sich die Kombinationen solcher Wellenfrontfehler auf die Sehqualität auswirken. Hier konnte Applegate bereits folgende Beobachtung machen: kombiniert man experimentell verschiedene Aberrationen miteinander, so können manche Kombinationen die Sehschärfe verschlechtern, andere können die Sehschärfe sogar verbessern. Kombinationen von Aberrationen, die zwei Ordnungsstufen auseinander liegen, gleiches Vorzeichen und gleiche Winkelfrequenz haben, verbesserten die Sehschärfe (z.B. Defokus und sphärische Aberration, Astigmatismus und sekundärer Astigmatismus). Solche Kombinationen von Aberrationen, die in der gleichen Ordnungsstufe liegen, führten zu einer Verschlechterung der Sehschärfe (z.B. sphärische Aberration und Quadrofoil, sphärische Aberration und sekundärer Astigmatismus) (Applegate et al., 2003).

Die objektiven Ergebnisse zur Kontrastempfindlichkeit spiegelten das subjektive Empfinden unserer Patienten wider. Acht Wochen nach dem Eingriff wurden die Patienten zur Zufriedenheit nach der Operation befragt. Kein Patient gab dabei schwankende Refraktionsänderungen, photische Phänomene oder Blendempfindlichkeit unter Tages- oder Dämmerungsbedingungen im Alltagsleben an.

Dies erklärt sich vor allem durch die Wahl der optischen Zone in Abhängigkeit vom unter skotopischen Bedingungen gemessenen Pupillendurchmesser, welcher früher



weniger beachtet worden ist. Die optische Zone war nie kleiner als der skotopisch ermittelte Pupillendurchmesser. Eine optische Zone von 7 mm sollte nach unseren Ergebnissen wegen der induzierten Aberrationen höherer Ordnung zwar bevorzugt werden, eine optische Zone von 6 mm bietet aber den Vorteil, dass zusätzliche, den korrigierenden Effekt verstärkende Inzisionen besser angelegt werden können. Ferner ist die korrigierende Wirkung von C-Cuts bei einer kleineren optischen Zone stärker, also besonders bei hohem Astigmatismus von Vorteil (Greene, Lindstrom, 1994).

#### **6.4 Kombination der C-Cuts mit weiteren operativen Eingriffen**

Kermani und Mitarbeiter stellten 2003 die AK-LASIK vor, ein zweistufiges Verfahren zur Korrektur von hohen myopen oder hyperopen Astigmatismen. Dabei zeigte sich ein Anstieg des RMS-Fehlers um den Faktor 1,95. Es handelt sich hierbei hauptsächlich um Trefoil-Verzeichnungen.

In einer weiteren Arbeit wurde zunächst eine astigmatische Keratotomie (AK, zwei 90 Grad lange, bogenförmige Inzisionen, je 180 Grad Abstand zueinander, 7 mm optische Zone) und mindestens zwei Monate danach LASIK zur Korrektur von myopen Astigmatismen durchgeführt. Das Ergebnis zeigte zunächst eine statistisch signifikante Zunahme der kornealen sphärischen Aberration sowie der kornealen Koma nach der AK. Nach LASIK kam es zu einer signifikanten Reduzierung der kornealen Koma und zu einem erneuten signifikanten Anstieg der kornealen sphärischen Aberration. Die Zunahme der sphärischen Aberration der Hornhaut nach LASIK wird auf die Veränderung der Asphärizität der Hornhaut von einer prolaten Form zu einer oblaten Form oder anders ausgedrückt von einer negativen zu einer positiven Asphärizität zurückgeführt (Montes-Mico et al., 2004).

Auch Ahera und Mitarbeiter konnten eine Veränderung der kornealen Asphärizität nach LASIK von einer prolaten zu einer oblaten Form nachweisen (Ahera et al., 2003).

Ob sich die Kombination zweier Verfahren auch günstig auf die Sehqualität auswirkt, müssen weitere Studien zeigen.

Limbale Entlastungsschnitte während der Kataraktoperation sind eine Möglichkeit zur Reduzierung des präoperativ existierenden Astigmatismus, wie zahlreiche Veröffentlichungen belegen (Täumer, 1999; Müller-Jensen, Schüler, 1999; Müller-Jensen et al., 1999; Wang et al., 2003).

Weiterhin ist dieses Verfahren unseres Erachtens durchaus geeignet zur Kombination mit refraktiver Hornhautchirurgie mit dem Excimerlaser. Zum Beispiel bei myopen Astigmatismusformen kann zuerst die operative Astigmatismuskorrektur mit Hornhautschnitten erfolgen und dann eine anschließende Laserbehandlung (LASIK, LASEK) der verbleibenden Myopie durchgeführt werden.

Zur Korrektur eines myopen Astigmatismus wurden die bogenförmigen Hornhautschnitte in Kombination mit einer photorefraktiven Keratektomie (PRK) angewandt und mit PRK in Kombination mit photoastigmatischer Keratektomie verglichen. Es stellte sich heraus, dass beide Kombinationsverfahren zur Korrektur des myopen Astigmatismus geeignet sind. Zu beachten bleibt jedoch, dass jeweils nur kleine Studiengruppen beobachtet wurden und dass sich die Gerätesoftware seit Beginn der Studie verändert hat und somit die Zentrierung der ablativen Zone bei astigmatischen Augen verbessert wurde (Alkara et al., 1998).

## **6.5 C-Cuts und Altern**

Die bisher dargestellten Verhältnisse werden dadurch kompliziert, dass sie nicht über das gesamte Leben stabil bleiben. Neuere Erkenntnisse kommen vor allem aus der Kataraktchirurgie: bei Jüngeren kann die positive sphärische Aberration der Hornhaut durch die negative sphärische Aberration der Linse teilweise ausgeglichen werden. Dieser Kompensationsmechanismus nimmt aber mit zunehmendem Lebensalter ab, da die sphärische Aberration der Linse mit zunehmendem Alter positiver wird (el-Hage, Berny, 1973; Artal, Guirao, 1998; Artal et al., 2001).

Unsere Untersuchungen lassen vermuten, dass auch mit einer Negativierung (nach der Malacara-Klassifikation [Malacara, 1992], eine Positivierung nach der OSA-Klassifikation) der sphärischen Aberration in diesem Patientenkollektiv zu rechnen ist. Dies könnte von Nachteil sein, da die positive sphärische Aberration (OSA-Klassifikation) nach herkömmlicher IOL-Implantation für das schlechte

Kontrastsehen mitverantwortlich gemacht wird und ihre Reduktion zur Verbesserung des Kontrastsehens führt (Mester et al., 2003).

Andere Untersuchungen zeigten auf, dass die korneale sphärische Aberration, wenn auch nur geringgradig, mit zunehmendem Alter zunimmt. Bei jungen Menschen liegt die korneale sphärische Aberration betragsmäßig über der gesamten sphärischen Aberration, das bedeutet, dass die inneren Oberflächen zumindest teilweise die sphärische Aberration der Hornhaut in jungen Jahren kompensieren. Auch in dieser Arbeit konnte gezeigt werden, dass dieser Kompensationsmechanismus mit zunehmendem Alter verschwindet (Artal et al., 2001).

In einer anderen Studie wurden Untersuchungen an Patienten durchgeführt, die sich mit der Frage der refraktiven Hornhautchirurgie vorstellten. Hier wurde dagegen festgestellt, dass die korneale sphärische Aberration sich im Lauf des Lebens nicht verändert. Lediglich die gesamten kornealen Aberrationen höherer Ordnung sowie die korneale Koma nahmen mit zunehmendem Lebensalter zu. Auch die gesamten Aberrationen höherer Ordnung und die gesamte sphärische Aberration des Auges stiegen mit zunehmendem Alter signifikant an. Es wurde somit postuliert, dass die Zunahme der gesamten sphärischen Aberration des Auges durch Veränderungen der Augenlinse verursacht wird (Wang, Koch, 2003).

Auch eine andere Arbeitsgruppe stellte fest, dass sowohl die gesamte korneale Aberration als auch die korneale Koma mit dem Alter korrelieren, jedoch die korneale sphärische Aberration nicht signifikant mit dem Alter variiert. Dies steht im Gegensatz zu vorhergehenden Studien, die belegten, dass eine positive Korrelation zwischen der kornealen sphärischen Aberration und dem Lebensalter besteht. Weiterhin konnte aufgezeigt werden, dass die gesamte korneale Aberration interindividuell stark variiert. Die gesamten Aberrationen höherer Ordnung und die Koma korrelieren positiv mit zunehmendem Alter, wie bereits Guirao und Mitarbeiter 2000 zeigten, die sphärische Aberration ändert sich jedoch nicht, wiederum ein Gegensatz zu vorigen Studien. Weiterhin wird postuliert, dass die positive sphärische Aberration durch die Hornhautvorderfläche verursacht wird. Um diese positive sphärische Aberration zu kompensieren, wird, wie bereits vorher erwähnt, eine klare Linse bzw. künstliche Intraokularlinse mit einer negativen sphärischen Aberration benötigt. Es wird jedoch die Frage offen gelassen, ob die Eliminierung aller Aberrationen wirklich zu einer perfekten Optik führt (Wang et al., 2003).

Eine weitere Arbeit bezüglich dieses Themas belegt, dass mithilfe der wellenfrontgesteuerten Hornhautchirurgie keinesfalls eine perfekte Optik erreicht werden kann, da z. B. die Korrektur der Farbfehler des Auges (chromatische Aberration) nicht möglich ist, die Stärke der Aberrationen vom Akkommodationszustand abhängt und die Aberrationen sich im Lauf der Zeit verändern (Wesemann, 2004).

Auch die korneale Koma wie auch die gesamte okuläre Koma nehmen mit ansteigendem Alter zu, wobei die gesamte Koma vor allem durch die korneale Koma verursacht wird. Auch hier konnte belegt werden, dass die korneale sphärische Aberration keine Veränderung mit zunehmendem Lebensalter durchmacht, die gesamte sphärische Aberration jedoch im Alter zunimmt. Es wird postuliert, dass der altersbedingte Anstieg der okulären sphärischen Aberration vor allem durch den Anstieg der sphärischen Aberration der inneren Oberflächen bedingt ist und nicht durch die korneale Aberration. Die altersbedingte Zunahme der okulären Koma wird vor allem durch den Anstieg der kornealen Koma bedingt (Amano et al., 2004).

Bei Normalsichtigen verdoppeln sich die optischen Abbildungsfehler zwischen dem 30. und dem 60. Lebensjahr (Artal et al., 2002). Die positiv werdende sphärische Aberration nach einer Astigmatismuskorrektur dürfte daher zumindest nicht von Nachteil sein, da sie die gleichgerichtete Entwicklung der natürlichen Linse, welche positiver wird, mit dem Alter nicht kompensiert. Die sphärische Aberration nimmt im Mittel um  $0,03 \mu\text{m}$  zwischen dem 21. und 60. Lebensjahr zu (5 mm Pupillenweite, Guirao et al., 2000).

Als klinische Folge wäre ein verbessertes Kontrastsehen mit zunehmendem Alter zu erwarten, auch wenn es sich bei diesem Patientengut um refraktionsamblyope Augen handelt.

## **6.6 Fazit für die Praxis**

Wir erachten die Astigmatismuskorrektur mit C-förmigen Hornhautschnitten als ein geeignetes Verfahren zur Korrektur höhergradiger Astigmatismusformen.

Die inzisionale Astigmatismuskorrektur bewirkt neben der angestrebten Korrektur des Zylinders auch Veränderungen der Sphäre und verursacht Wellenfrontfehler

höherer Ordnung. Die Änderungen betreffen vor allem Wellenfrontfehler mit höherer Winkelfrequenz und höherer radialer Ordnung. Wie im vorigen Kapitel erwähnt führt dies jedoch nur minimal zu einer Beeinträchtigung der Sehqualität, da der Einfluss mit zunehmender radialer Ordnung abnimmt.

Die ermittelte Verbesserung des Kontrastsehens unter photopischen und mesopischen Bedingungen nach dem operativen Eingriff zeigt jedenfalls, dass eine optische Zone von 7 mm bevorzugt werden sollte, da sie circa 1/3 weniger Aberrationen höherer Ordnung induziert. Eine Pupillenmessung sollte präoperativ durchgeführt werden und mitentscheidend sein für die Wahl der optischen Zone.

## 7. LITERATUR

1. Akura J, Matsuura K, Hatta S, Otsuka K, Kaneda S (2000): A new concept for the correction of astigmatism: full-arc, depth-dependent astigmatic keratotomy. *Ophthalmology* 107: 95-104.
2. Akura J, Matsuura K, Hatta S, Kaneda S, Ikeda T (2001): Experimental study using pig eyes for realizing ideal astigmatic keratotomy. *Cornea* 20: 325-328.
3. Alkara N, Genth U, Seiler T (1998): Astigmatismuskorrektur mittels PRK kombiniert mit T-Inzision und photoastigmatischer Keratektomie. *Ophthalmologe* 95: 677-683.
4. Amano S, Amano Y, Yamagami S, Miyai T, Miyata K, Samejima T, Oshika T (2004): Age-related changes in corneal and ocular higher-order wavefront aberrations. *Am J Ophthalmol* 137: 988-992.
5. Anders N, Pham DT, Huebscher H-J, Wollensak J (1995): Bogenförmige lamellierende Keratotomie zur Astigmatismuskorrektur - Klinische Ergebnisse. In: 9. Kongress der DGII 1995. Rochels R, Duncker G, Hartmann C (eds). Springer-Verlag, Berlin Heidelberg. pp 309-318.
6. Anders N, Pham DT, Linke C, Wollensak J (1996): Bogenförmige lamellierende Keratotomie zur Astigmatismuskorrektur – experimentelle und erste klinische Ergebnisse. *Ophthalmologe* 93: 279-283.
7. Anders N, Pham DT, Huebscher H-J, Linke C, Wollensak J (1997): Correcting postoperative astigmatism using curved lamellating keratotomy. *J Cataract Refract Surg* 23: 196-201.
8. Anders N, Jarosewski J, Heuermann T (2001): Limbale Relaxierende Inzisionen (LRI) zur Korrektur eines hohen präoperativen Astigmatismus. In: 15. Kongress der DGII 2001. Demeler U, Völcker HE, Auffarth GU (eds). Springer-Verlag, Berlin Heidelberg. pp 241-248.
9. Anera RG, Jimenez JR, Jimenez del Barco L, Bermudez J, Hita E (2003): Changes in corneal asphericity after laser in situ keratomileusis. *J Cataract Refract Surg* 29: 762-768.

10. Applegate RA, Sarver EJ, Khemsara V (2002): Are All Aberrations Equal? J Refract Surg 18: 556-562.
11. Applegate RA, Marsack JD, Ramos R, Sarver EJ (2003): Interaction between aberrations to improve or reduce visual performance. J Cataract Refract Surg 29: 1487-1495.
12. Artal P, Guirao A (1998): Contribution of the cornea and the lens to the aberrations of the human eye. Opt Lett 23: 1713-1715.
13. Artal P, Guirao A, Berrio E, Williams DR (2001): Compensation of corneal aberrations by the internal optics in the human eye. J Vis 1: 1-8.
14. Artal P, Berrio E, Guirao A, Piers P (2002): Contribution of the cornea and internal surfaces to the change of ocular aberrations with age. J Opt Soc Am A Opt Image Sci Vis 19: 137-143.
15. Atkin A, Asbell P, Justin N, Smith H, Wayne R, Winterkorn J (1986): Radial keratotomy and glare effects on contrast sensitivity. Doc Ophthalmol 62: 129-148.
16. Atkinson J, Braddick O, French J (1980): Infant astigmatism: Its disappearance with age. Vision Res 20: 891-893.
17. Auffarth GU, Hunold W, Hürtgen P, Wesendahl TA, Mehdorn E (1994): Nachtfahrtauglichkeit pseudophaker Patienten. Ophthalmologe 91: 454-459.
18. Bayramlar H, Daglioglu MC, Borazan M (2003): Limbal relaxing incisions for primary mixed astigmatism and mixed astigmatism after cataract surgery. J Cataract Refract Surg 29: 723-728.
19. Burns SA (2000): The spatially resolved refractometer. J Refract Surg 16: 566-569.
20. BVA: Leitlinien des Berufsverbandes der Augenärzte Deutschlands e. V. Leitlinie Nr. 26a: Amblyopie. Stand Juli 2003.
21. Dick HB, Augustin AJ (2001): Lens implant selection with absence of capsular support. Curr Opin Ophthalmol 12: 47-57.
22. Donders FC (1862): Astigmatismus und cylindrische Glaeser. Verlag von Hermann Peters, Berlin.
23. Draeger J, Winter R, Engelmann K, Kohlhaas M (1995): Hornhautmorphologie. In: Augenärztliche Untersuchungsmethoden. Straub W, Kroll P, Küchle HJ (eds). 2. Auflage. Enke Verlag, Stuttgart. pp 28-37.

24. Drum BA (2003): Aberration analyses needed for FDA evaluation of safety and effectiveness of wavefront-guided refractive surgical devices. *J Refract Surg* 19: 588-591.
25. el-Hage SG, Berny F (1973): Contribution of crystalline lens to the spherical aberration of the eye. *J Opt Soc Am* 63: 205-211.
26. Ellis W (1991): Keratotomy surgery for myopia, hyperopia, and astigmatism. Medical Textbook Division, Eye center of N. California, El Cerrito, California.
27. Förster W (1995): Topographie der Hornhaut. In: *Augenärztliche Untersuchungsmethoden*. Straub W, Kroll P, Küchle HJ (eds). 2. Auflage. Enke Verlag, Stuttgart. pp 248-254.
28. Frohn A, Dick HB, Thiel H-J (1999): Implantation of a toric poly(methyl methacrylate) intraocular lens to correct high astigmatism. *J Cataract Refract Surg* 25: 1675-1678.
29. Fyodorov S (1980): Methods of radial keratotomy. In: *Proceedings of the Keratorefractive Society Meeting*. Denison, TX: LAL Publishing Co. pp 11,35.
30. Fyodorov S (1980): Surgical correction of myopia and astigmatism. In: *Proceedings of the Keratorefractive Society Meeting*. Denison, TX: LAL Publishing Co. pp 141-172.
31. Fyodorov S, Ivashina A (1982): Longterm results of anterior radial keratotomy (RK). *Journal of Ocular Therapy and Surgery* 1: 217.
32. Ghaith AA, Daniel J, Stulting RD, Thompson KP, Lynn M (1998): Contrast sensitivity and glare disability after radial keratotomy and photorefractive keratectomy. *Arch Ophthalmol* 116: 12-18.
33. Gills JP, Martin RG, Thornton SP (1994): Astigmatic Keratotomy in the cataract patient. In: *Surgical Treatments of Astigmatism*. Gills JP, Martin RG, Thornton SP, Sanders DR (eds). Slack, Thorofare. pp 27-48.
34. Ginsburg AP, Waring GO 3rd, Steinberg EB, Williams PA, Justin N, Deitz JR, Roszka-Duggan VK, Baluveit K, Bourque L (1990): Contrast sensitivity under photopic conditions in the Prospective Evaluation of Radial Keratotomy (PERK) Study. *Refract Corneal Surg* 6: 82-91.
35. Grene RB, Lindstrom RL (1994): Astigmatic Keratotomy in the refractive Patient: The ARC-T Study. Gills JP, Martin RG, Thornton SP, Sanders DR (eds). Slack, Thorofare. pp 11-26.



36. Grosskopf U, Eisenmann D (1997): Eingeschränkte Nachtfahrtauglichkeit bei mono- und multifokaler Pseudophakie. In: 10. Kongress der DGII 1996. Vörösmarthy D, Duncker G, Hartmann C (eds). Springer-Verlag, Berlin Heidelberg. pp 20-24.
37. Guell JL, Vazquez M, Malecaze F, Manero F, Gris O, Velasco F, Hulin H, Pujol J (2003): Artisan toric phakic intraokular lens for the correction of high astigmatism. *Am J Ophthalmol* 136: 442-447.
38. Guirao A, Redondo M, Artal P (2000): Optical aberrations of the human cornea as a function of age. *J Opt Soc Am A Opt Image Sci Vis* 17: 1697-1702.
39. Haase M (1971): *Optiker-Taschenbuch*. Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft mbH, Stuttgart.
40. Haase W (1995): Amblyopie. In: *Strabismus*. Kaufmann H (ed). Ferdinand Enke Verlag Stuttgart. pp 283-395.
41. Happe W: *Memorix Augenheilkunde*. Chapman & Hall, 1996.
42. Hassaballa MA, Ayala MJ, Alio JL (2003): Laser in situ keratomileusis correction of mixed astigmatism by bitoric ablation. *J Cataract Refract Surg* 29: 1889-1895.
43. Helmholtz H (1867): *Handbuch der physiologischen Optik*. Leopold Voss, Leipzig. pp 137-147
44. Hemenger RP, Tomlinson A, Caroline PJ (1989): Role of spherical aberration in contrast sensitivity loss with radial keratotomy. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 30: 1997-2001.
45. Hjortdal JO, Olsen H, Ehlers N (2002): Prospective randomized study of corneal aberrations 1 year after radial keratotomy or photorefractive keratectomy. *J Refract Surg* 18: 23-29.
46. Howland HC, Atkinson J, Braddick O, French J (1978): Infant astigmatism measured by photorefraction. *Science* 202: 331-333.
47. Hugger P, Knorz MC, Jendritza B, Liermann A, Liesenhoff H (1999): Dämmerungssehen und Blendempfindlichkeit nach Laser-in-situ-Keratomileusis (LASIK) zur Myopiekorrektur. In: 12. Kongress der DGII 1998. Duncker G, Ohrloff C, Wilhelm F (eds). Springer-Verlag, Berlin Heidelberg. pp 583-589.

48. Hütz WW, Eckhardt HB, Gehm U, Frank HU, Wolff R (1995): Photorefraktive Astigmatismkorrektur. In: 9. Kongress der DGII 1995. Rochels et al. (eds). Springer-Verlag, Berlin Heidelberg. pp: 465-472.
49. Hütz WW, Eckhardt AB, Heinrich AW (2000): Die Langzeitstabilität der Resultate nach photoablativer Astigmatismuskorrektur. In: 14. Kongress der DGII 2000. Wenzel et al. (eds). Biermann Verlag Köln. pp 600-607.
50. Ikeda H, Tremain KE (1978): Amblyopia resulting from penalisation: neurophysiological studies of kittens reared with atropinisation of one or both eyes. Br J Ophthalmol 62: 21-28.
51. Kaufmann H: Strabismus (2003): 3.Auflage, Thieme Verlag Stuttgart, New York. pp 274-277.
52. Kermani O, Gerten G, Oberheide U (2003): Die AK-LASIK: eine neue chirurgische Methode zur Korrektur hoher Astigmatismen, Vortrag auf dem 16. Kongress der DOC, Nürnberg.
53. Kohnen T, Steinkamp GWK, Schnitzler E-M, Ohrloff C (2000): Laser-in-situ-Keratomileusis (LASIK) zur Behandlung höhergradiger Myopien und myoper Astigmatismen mit dem Planoscan-Excimerlasersystem (Keracor 217, Hansatome). In: 13. Kongress der DGII 1999. Kohnen et al. (eds). Biermann Verlag Köln. pp 515-520.
54. Kohnen T, Mirshahi A, Cichocki M, Bühren J, Steinkamp GW (2003): Laser-in-situ-Keratomileusis zur Korrektur von Hyperopie und hyperopen Astigmatismen mit Scanning-Spot-Excimer-Laser. Einjahresergebnisse einer prospektiven klinischen Studie. Ophthalmologie 12:1071-1078.
55. Kohnen T, Baumeister M, Cichocki M (2005): Intraokularlinsen zur Korrektur von Refraktionsfehlern. Teil I: Phake Vorderkammerlinsen. Ophthalmologie 102: 1003-1018.
56. Kohnen T, Kasper T, Terzi E (2005): Intraokularlinsen zur Korrektur von Refraktionsfehlern. Teil II: Phake Hinterkammerlinsen und refraktiver Linsenaustausch mit Hinterkammerlinsenimplantation. Ophthalmologie 102: 1105-1119.
57. Kohnen T, Strenger A (2005): Aktueller Stand der refraktiven Chirurgie – Möglichkeiten und Ergebnisse. Vortrag gehalten auf der Bielschowsky-Tagung am 19.11.2005 in Gießen.

58. Krasnov MM, Avetisov SE, Makashova NV, Mamikonian VR (1988): The effect of radial keratotomy on contrast sensitivity. *Am J Ophthalmol* 105: 651-654.
59. Kwitko ML, Jovkar S, Yan H, Rymer S (1996): Arcuate keratotomy to correct naturally occurring astigmatism. *J Cataract Refract Surg* 22: 1439-1442.
60. Lachenmayr B, Pateras N (1987): Dämmerungssehvermögen und Blendempfindlichkeit bei Pseudophaken. *Fortschr Ophthalmol* 84: 173-179.
61. Lackner B, Pieh S, Hanselmayer G, Schmidinger G, Skorpik C (2001): Kontrastsehschärfe nach LASIK. In: 15. Kongress der DGII 2001. Demeler U, Völcker HE, Auffarth GU (eds). Springer-Verlag, Berlin Heidelberg. pp 279-283.
62. Langenbucher A, Viestenz A, Seitz B (2004): Berechnung torischer Kunstlinsen. *Ophthalmol-Chirurgie* 1: 25-33.
63. Lee YC, Hu FR, Wang IJ (2003): Quality of vision after laser in situ keratomileusis: influence of dioptric correction and pupil size on visual function. *J Cataract Refract Surg* 29: 769-777.
64. Liang J, Grimm B, Goelz S, Bille JF (1994): Objective measurement of wave aberrations of the human eye with the use of a Hartmann-Shack wave-front sensor. *J Opt Soc Am A Opt Image Sci Vis* 11: 1949-1957.
65. Liang J, Williams D (1997): Aberrations and retinal image quality of the normal human eye. *J Opt Soc Am A* 14: 2873-2883.
66. Malacara D (1992): *Optical Shop Testing*. Second ed. John Willy and Sons, Inc. New York.
67. Mester U (1994): Operative Behandlung des Astigmatismus. Teil 1: Grundlagen. *Ophthalmol-Chirurgie* 6: 173-179.
68. Mester U (1995): Operative Behandlung des Astigmatismus. Teil 2: Ergebnisse und praktisches Vorgehen. *Ophthalmol-Chirurgie* 7: 15-21.
69. Mester U, Dillinger P, Anterist N (2003). Impact of a modified optic design on visual function: Clinical comparative study. *J Cataract Refract Surg* 29: 652-660.
70. Mierdel P, Krinke H-E, Wiegand W, Kaemmerer M, Seiler T (1997): Messplatz zur Bestimmung der monochromatischen Aberration des menschlichen Auges. *Ophthalmologie* 94: 441-445.
71. Mierdel P, Kaemmerer M, Krinke HE, Seiler T (1999): Effects of photorefractive keratectomy and cataract surgery on ocular optical errors of higher order. *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol* 237: 725-729.

72. Mierdel P, Kaemmerer M, Mrochen M, Krinke HE, Seiler T (2000): An automated aberrometer for clinical use. SPIE Proceedings 3908: 86-92.
73. Molebny VV, Pallikaris IG, Naoumidis LP, Kurashov VN, Chyzh ICH (1997): Eye investigation with optical microradar techniques. SPIE Proceedings 3065:191-199.
74. Molebny VV, Panagopoulou SI, Molebny SV, Wakil YS, Pallikaris IG (2000): Principles of ray tracing aberrometry. J Refract Surg 16: 572-575.
75. Montes-Mico R, Charman WN (2002): Mesopic contrast sensitivity function after excimer laser photorefractive keratectomy. J Refract Surg 18: 9-13.
76. Montes-Mico R, Munoz G, Albarran-Diego C, Rodriguez-Galietero A, Alio JL (2004): Corneal aberrations after astigmatic keratotomy combined with laser in situ keratomileusis. J Cataract Refract Surg 30: 1418-1424.
77. Moreno-Barriuso E, Lloves JM, Marcos S, Navarro R, Llorente G, Barbero S (2001): Ocular aberrations before and after myopic corneal refractive surgery: LASIK-induced changes measured with laser ray tracing. Invest Ophthalmol Vis Sci 42: 1396-1403.
78. Mrochen M, Kaemmerer M, Mierdel P, Krinke HE, Seiler T (2000): Principles of Tscherning aberrometry. J Refract Surg 16: 570-571.
79. Mrochen M, Kaemmerer M, Mierdel P, Krinke HE, Seiler T (2001): Is the human eye a perfect optic? SPIE Proceedings, Ophthalmic Technologies XI, 4245: 30-35.
80. Mrochen M, Kaemmerer M, Mierdel P, Seiler T (2001): Increased higher-order optical aberrations after laser refract surgery: a problem of subclinical decentration. J Cataract Refract Surg 27: 362-369.
81. Mrochen M, Seiler T (2001): Grundlagen der wellenfrontgeführten refraktiven Hornhautchirurgie. Ophthalmologe 98: 703-714.
82. Müller HM, Steinkamp GWK, Richter R, Koch MJ, Nutzenberger A, Roschen A, Ohrloff C (1998): Unerwünschte Effekte nach PRK bei Myopien und myopem Astigmatismus. In: 11. Kongress der DGII 1997. Ohrloff C (eds). Springer-Verlag, Berlin Heidelberg. pp 525-531.
83. Müller-Jensen K, Fischer P, Siepe U (1999): Limbal relaxing incisions to correct astigmatism in clear corneal cataract surgery. J Refract Surg 15: 586-589.

84. Müller-Jensen K, Schüler M (1999): Reduktion eines hohen Astigmatismus durch 4 mm lange korneale Stretch-Inzision mit Phakoemulsifikation und 5-mm-PMMA-Linsen-Implantation. In: 12. Kongress der DGII 1998. Duncker G, Ohrloff C, Wilhelm F (eds). Springer-Verlag, Berlin Heidelberg. pp 670-678.
85. Nordwald K, Anders N, Walkow T, Pham DT (1999): Langfristige Stabilität der Astigmatismusänderung nach bogenförmiger lamellierender Keratotomie (BLK). *Ophthalmologie* 96: 453-458.
86. Pallikaris IG, Kymionis GD, Panagopoulou SI, Siganos CS, Theodorakis MA, Pallikaris AI (2002): Induced optical aberrations following formation of a laser in situ keratomileusis flap. *J Cataract Refract Surg* 28: 1737-1741.
87. Pham DT (1993): Kataraktchirurgie und Intraokularlinsen-Implantation mit der No-Stitch-Technik. In: 7. Kongress der DGII 1993. Robert et al. (eds). Springer-Verlag, Berlin Heidelberg. pp 79-87.
88. Prinz G, Mester U (1995): Ergebnisse der Astigmatismuskorrektur mit transversalen Hornhautinzisionen. In: 9. Kongress der DGII 1995. Rochels R, Duncker G, Hartmann C (eds). Springer-Verlag, Berlin Heidelberg. pp 473-478.
89. Pulaski J (2002): Arcuate keratotomy for asymmetrical steep islands after laser in situ keratomileusis and automated lamellar keratoplasty. *J Cataract Refract Surg* 28: 1424-1432.
90. Quentin CD, Meyer-Riemann W, Genee D (2001): Torische Intraokularlinse zur Korrektur hoher Astigmatismen. In: 15. Kongress der DGII 2001. Demeler U, Völcker HE, Auffarth GU (eds). Springer-Verlag, Berlin Heidelberg. pp 249-253.
91. Rashid EO, Waring GO 3rd (1992): Complications of refractive keratotomy. In: *Refractive Keratotomy for myopia and astigmatism*. Waring III GO (ed) Mosby, St.Louis. pp 889-892.
92. Ruhswurm I, Scholz U, Zehetmayer M, Hanselmayer G, Vass C, Skorpik C (2000): Astigmatism correction with a foldable toric intraocular lens in cataract patients. *J Cataract Refract Surg* 26: 1022-1027.
93. Schlote T, Derse M, Wannke B, Bende T, Jean B (1999): Beeinflussung des mesopischen Sehens durch die photorefraktive Keratektomie (PRK) zur Myopiekorrektur. *Klin Monatsbl Augenheilkd* 214: 136-141.

94. Seiler T, Wollensak J (1993): Über die mathematische Darstellung des postoperativen regulären Hornhautastigmatismus. *Klin Monatsbl Augenheilkd* 203: 70-76.
95. Seiler T, Kaemmerer M, Mierdel P, Krinke HE (2000): Ocular optical aberrations after photorefractive keratectomy for myopia and myopic astigmatism. *Arch Ophthalmol* 118: 17-21.
96. Snellen H (1869): Die Richtung der Hauptmeridiane des astigmatischen Auges. *Albrecht von Graefes Archives of Clin Exp Ophthalmology* 15: 199-207.
97. Steinkamp GWK, Kohlen T, Schnitzler E-M, Baumeister M, Ohrloff C (2000): LASIK versus PRK bei der Behandlung niedriger Myopien und myopischer Astigmatismen. In: 13. Kongress der DGII 1999. Kohlen et al. (eds). Biermann Verlag Köln. pp 502-506.
98. Täumer RA (1999): T-Cut bei Phako zur Astigmatismusreduktion. In: 12. Kongress der DGII 1998. Duncker G, Ohrloff C, Wilhelm F (eds). Springer-Verlag, Berlin Heidelberg. pp 661-669.
99. Thibos LN, Applegate RA, Schwiegerling JT, Webb R; VSIA Standards Taskforce Members. *Vision science and its applications (2002): Standards for reporting the optical aberrations of eyes.* *J Refract Surg* 18: 652-660.
100. Thornton SP (1990) Astigmatic keratotomy: A review of basic concepts with case reports. *J Cataract Refract Surg* 16: 430-435.
101. Thornton SP (1994): Background and theory of corneal relaxing incisions. In: *Surgical Treatments of Astigmatism.* Gills JP, Martin RG, Thornton SP, Sanders DR (eds). Slack, Thorofare. pp 1-9.
102. Tomidokoro A, Soya K, Miyata K, Armin B, Tanaka S, Amano S, Oshika T (2001): Corneal irregular astigmatism and contrast sensitivity after photorefractive keratectomy. *Ophthalmology* 108: 2209-2212.
103. Tscherning M (1994): Die monochromatischen Aberrationen des menschlichen Auges. *Z Psychol Physiol Sinne* 6: 456-471.
104. Tsioulis G, Droutsas D, Moschos M, David G, Theodossiadis G (2000): Arcuate relaxing incisions with a 5.00-mm optical zone for the correction of high postcataract astigmatism. *Ophthalmologica* 214: 385-389.

105. Viestenz A, Seitz B, Langenbacher A (2001): Veränderungen der Tiefenschärfe in Abhängigkeit von der Pupillenweite nach photorefraktiver Keratektomie. *Klin Monatsbl Augenheilkd* 218: 498-502.
106. Viestenz A, Langenbacher A, Kühle M, Seitz B (2004): Korrektur des persistierenden Astigmatismus nach perforierender Keratoplastik mittels torischer Kunstlinsen. In: 18. Kongress der DGII 2004. Pham T, Auffarth GU, Wirbelauer C, Demeler U (eds). Biermann Verlag, Köln. pp 387-394.
107. Viestenz A, Kühle M, Seitz B, Langenbacher A (2005): Torische Kunstlinsen zur Korrektur eines persistierenden kornealen Astigmatismus nach perforierender Keratoplastik. *Ophthalmologie* 102: 147-152.
108. Viestenz A, Seitz B, Langenbacher A (2005): Evaluation of the eye's rotational stability during standard photography: effect on determining the axial orientation of toric intraocular lenses. *J Cataract Refract Surg* 31: 557-561.
109. Waltersdorfer R, Berglöff J, Uyguner I, Hanselmayer H (1991): Kontrastsehschärfe unter Blendung – Vergleichende Untersuchungen bei Patienten mit normalem Linsenstatus, mit beginnender Katarakt, mit Implantlinsen. In: 5. Kongress der DGII 1991. Wenzel et al. (eds). Springer-Verlag, Berlin Heidelberg. pp 503-510.
110. Wang L, Misra M, Koch DD (2003): Peripheral corneal relaxing incisions combined with cataract surgery. *J Cataract Refract Surg* 29: 712-722.
111. Wang L, Dai E, Koch DD, Nathoo A (2003): Optical aberrations of the human anterior cornea. *J Cataract Refract Surg* 29: 1514-1521.
112. Wang L, Koch DD (2003): Ocular higher-order aberrations in individuals screened for refractive surgery. *J Cataract Refract Surg* 29: 1896-1903.
113. Webb RH, Penney CM, Thompson KP (1992): Measurement of ocular local wave-front distortion with a spatially resolved refractometer. *Applied Optics* 31: 3678-3686.
114. Wesemann W (2004): Optische und physiologische Grenzen der wellenfrontgesteuerten Hornhautchirurgie. *Ophthalmologie* 101: 521-537.

## **8. PUBLIKATIONEN/DANK**

### **8.1 Publikationen**

Die vorliegende Arbeit wurde auf dem 17. Kongress der Deutschsprachigen Gesellschaft für Intraokularlinsen-Implantation und refraktive Chirurgie (DGII) am 14. Februar 2003 in Ludwigshafen vorgetragen.

### **8.2 Dank**

Mein Dank gilt allen ärztlichen und nichtärztlichen Arbeitskolleginnen und –kollegen, die mir bei der Durchführung der vorliegenden Arbeit behilflich waren.

Herrn Prof. Dr. U. Mester danke ich herzlich für die Überlassung des Themas und die hilfsbereite Betreuung bei der Durchführung und der inhaltlichen Aufarbeitung.

Gleichzeitig möchte ich mich bei Herrn Dr. H. Kaymak bedanken, der mir bei der Verwirklichung der Arbeit jederzeit hilfreich zur Seite stand.

Herrn Prof. Dr. B. Seitz möchte ich für seine hilfreichen Bemühungen danken.



## **9. LEBENSLAUF**

Püttlingen, 15.10.2007

Katja Kremp