

Aus der Universitätsklinik und Poliklinik für Augenheilkunde
der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg
Direktor: Professor Dr. med. habil. G.I.W. Duncker

**Untersuchungen zu optischen Aberrationen, Dämmerungssehen,
Blendungsempfindlichkeit und Kontrastsensitivität nach
refraktiv-chirurgischen Lasereingriffen**

DISSERTATION

zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Medizin (Dr. med.)

vorgelegt

der Medizinischen Fakultät
der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg

von Maria Heynemann

geboren am 03.03.1980 in Halle/ Saale

Gutachter:

- 1.
- 2.

Kurzreferat

Die Wellenfront-LASIK unterscheidet sich von der konventionellen LASIK durch ein erweitertes Ablationsprofil, durch das nicht nur Brechungsfehler 2. Ordnung, sondern auch Brechungsfehler höherer Ordnung korrigiert werden. Durch die Ablation werden aber auch Aberrationen induziert. Ziel dieser Arbeit ist es, herauszufinden, in welchem Maße präoperativ gemessene Aberrationen korrigiert und wie viele induziert werden in Abhängigkeit vom Ablationsprofil. Im Rahmen einer prospektiven, monozentrischen Untersuchung wurden von Februar 2004 bis Juli 2005 116 Augen von 63 Patienten mit Myopien von -1,6 dpt bis -10,4 SÄ entweder mit der konventionellen oder der wellenfrontgeführten LASIK operiert. Es erfolgte die Erfassung beider Ablationsprofile hinsichtlich Wellenfront, Dämmerungssehen, Blendungsempfindlichkeit, Kontrastsehen und Visus.

Nach Wellenfront-LASIK stieg der Wellenfrontfehler weniger stark an als nach konventioneller LASIK. Im Korrekturbereich bis -5 dpt SÄ konnte er sich nach Wellenfront-LASIK sogar verbessern. Vertikales und horizontales Koma blieben nach Wellenfront-LASIK unverändert, während sie sich nach konventioneller LASIK verschlechterten. Im niedrigmyopen Korrekturbereich profitierten auch die sphärischen Aberrationen von der Wellenfront-LASIK. Nach konventioneller LASIK lagen 93,1% und nach Wellenfront-LASIK 89,7% der operierten Patienten innerhalb von $\pm 0,5$ dpt SÄ um die Emmetropie. Beide Ablationsprofile führten bei Korrekturen > -5 dpt SÄ zu einer Verschlechterung des Dämmerungssehens und der Blendungsempfindlichkeit. Die Wellenfront-LASIK zeigte gegenüber der konventionellen LASIK ein verbessertes photopisches und mesopisches Kontrastsehen in beiden Korrekturbereichen.

Schlussfolgernd ist festzustellen, daß durch die Wellenfront-LASIK bei Korrekturen < -5 dpt SÄ eine Reduktion der Gesamtaberrationen möglich ist. Die Korrektur von Myopien > -5 dpt SÄ führen häufig zu einer Verschlechterung von Dämmerungssehen und Blendungsempfindlichkeit unabhängig vom LASIK-Typ. Die Wellenfront-LASIK ist zusätzlich in der Lage die postoperative Kontrastsensibilität zu verbessern.

Heynemann, Maria: Untersuchungen zu optischen Aberrationen, Dämmerungssehen, Blendungsempfindlichkeit und Kontrastsensitivität nach refraktiv-chirurgischen Lasereingriffen.

Halle, Univ., Med. Fak., Diss., 68 Seiten, 2009

Inhaltsverzeichnis

Kurzreferat	II
Inhaltsverzeichnis	III
Verzeichnis der Abkürzungen	V
1. Einleitung	1
1.1 Anatomie und Optik des Auges	1
1.2 Wellenfront	2
1.3 Aberrationen	2
1.3.1 Myopie	3
1.3.2 Hyperopie	4
1.3.3 Astigmatismus	5
1.3.4 Emmetropie	5
1.3.5 Aberrationen höherer Ordnung	5
1.3.6 Messung der Wellenfrontdeformation	8
1.4 Optische Qualitäten	9
1.4.1 Lichtsinn	9
1.4.2 Sehschärfe	9
1.5 LASIK	10
1.5.1 Ablauf der LASIK	10
1.5.2 Lasertechnik	11
1.5.3 Konventionelle LASIK, Wellenfrontgeführte LASIK	11
1.6 Fragestellung	11
2. Ziele	12
3. Patienten und Methoden	13
3.1 Patienten	13
3.2 Methoden	15
3.2.1 Aberrometrie	16
3.2.2 Visus	17
3.2.3 Dämmerungssehen, Blendungsempfindlichkeit	17
3.2.4 Kontrastsensitivität	17
3.2.5 Fragebogen	19
3.2.6 Statistische Analyse	19

4. Ergebnisse	20
4.1.1 Wellenfrontanalyse auf der Basis des Wellenfrontfehlers	20
4.1.2 Wellenfrontanalyse durch Auswertung der Einzelaberrationen	22
4.2 Ergebnisse der subjektiven postoperativen Refraktion	25
4.3 Ergebnisse: Dämmerungssehen, Blendungsempfindlichkeit	28
4.4 Ergebnisse: Kontrastsensitivität	32
4.5 Auswertung des Fragebogens	34
5. Diskussion	35
6. Zusammenfassung	47
7. Literatur	49
8. Anhang 1: Tabellen zur Teststatistik	55
9. Anhang 2: Fragebogen	61
10. Thesen	63
Lebenslauf	65
Selbständigkeitserklärung	66
Hinweise auf Publikationen und Vorträge	67
Danksagung	68

Verzeichnis der Abkürzungen

Abb.	Abbildung
cd/m ²	candela per square metre
cpd	cycle per degree
d.h.	das heißt
dpt	Dioptrien
et al.	et alii
F.A.C.T.	functional acuity contrast test
ggf.	gegebenenfalls
HOA	high order aberration
HO -RMS	high order - root mean square
LASIK	Laser in situ Keratomileusis
LogMAR	dekadische Logarithmus des minimum angle of resolution
µm	Mikrometer
min	Minuten
nm	Nanometer
PSF	point spread function
RMS	root mean square
S.	Seite
SÄ	sphärisches Äquivalent
Tab.	Tabelle
vgl.	vergleiche
z.B.	zum Beispiel

1. Einleitung

1.1 Anatomie und Optik des Auges

Anatomisch besteht das menschliche Auge aus 3 Schichten und 3 Kammern [Sachsenweger et al. 2003]. Die äußere Schicht setzt sich aus der Sklera (Lederhaut) und der Cornea (Hornhaut) zusammen. Die mittlere Schicht, die Uvea, besteht aus der Iris (Regenbogenhaut), dem Corpus ciliare (Ziliarkörper) und der Choroidea (Aderhaut). Die innere Schicht ist die Retina (Netzhaut). Die vordere Augenkammer wird von der Hornhaurückseite, dem Kammerwinkel, dem Ziliarkörper, der Irisvorderfläche sowie der Linsenvorderfläche gebildet und ist mit Kammerwasser gefüllt. Die hintere Augenkammer setzt sich aus der Irisrückfläche, dem Ziliarkörper, der Linse und der vorderen Glaskörpergrenzschicht zusammen. Die dritte Kammer ist der Corpus vitreus (Glaskörper), der sich zwischen Linsenrückfläche, Ziliarkörper und Retina befindetet (siehe Abb. 1).

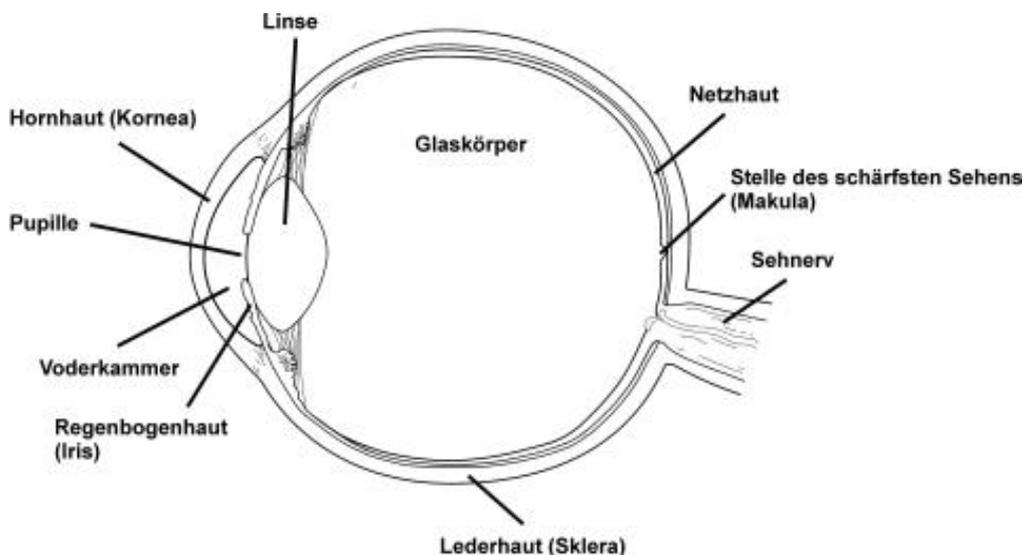


Abb. 1: Anatomie des Auges (http://www.uniklinikum-regensburg.de/kliniken-institute/Augenheilkunde/Informationen_f__r_Patienten/Refraktive_Chirurgie/Fehlsichtigkeiten/Normalsichtigkeit/index.php)

Funktionell wird das Auge in einen optischen und einen rezeptorischen Abschnitt eingeteilt. Den optischen Teil eines normalsichtigen Auges bilden die brechenden Medien (Hornhaut, vordere Augenkammer, Linse, Glaskörper). Sie vereinigen die von einer Lichtquelle im Unendlichen ausgehenden und parallel ins Auge einfallenden Lichtstrahlen in der Fovea centralis der Makula (Stelle des schärfsten Sehens). Auf der Netzhaut entsteht ein verkleinertes und umgekehrtes Bild. In der

Retina erfolgt die Umwandlung von Licht in elektrische Impulse. In der Fovea wird aufgrund der hohen Rezeptordichte das physikalische Optimum der Auflösung erreicht. Zum rezeptorischen Teil gehören die Retina und der Nervus opticus (Sehnerv), die bereits dem Zentralnervensystem zugehörig sind [Schiebler et al. 1999]. Die elektrischen Impulse werden vom Nervus opticus über das Chiasma opticum (Sehnervenkreuzung), den Tractus opticus (Sehstrang), das Corpus geniculatum laterale (primäres Sehzentrum) und die Radiatio optica (Sehstrahlung) zur Sehrinde geleitet, wo der Seheindruck entsteht [Sachsenweger et al. 2003].

1.2 Wellenfront

Betrachtet man Licht als elektromagnetische Wellen und verbindet alle Wellen in einem Punkt gleichen Phase, erhält man die Wellenfront [Bühren und Kohnen 2007 a]. Die Wellenfront steht immer 90° zum einzelnen Lichtstrahl (Voraussetzung: parallel einfallende Lichtstrahlen einer Quelle im Unendlichen). Vor dem Auge ist die Wellenfront eine ebene Fläche (siehe Abb. 2). Im perfekten optischen System nimmt sie aufgrund der Konvergenz der Lichtstrahlen eine sphärische Form an.

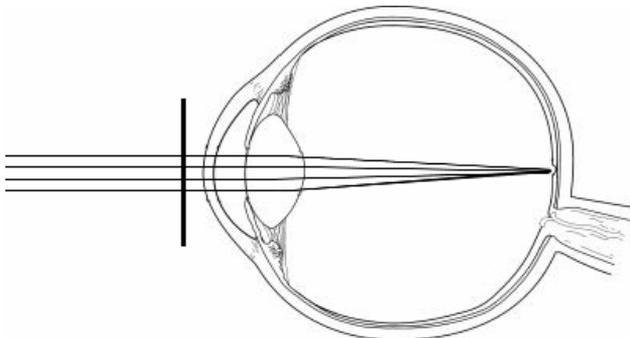


Abb. 2: Ideale Wellenfront

1.3 Aberrationen

Ein perfektes optisches System bildet ein punktförmiges Objekt als Punkt in der Fovea ab. Das menschliche Auge ist jedoch kein perfektes optisches System [Bühren und Kohnen 2007 a]. Es weist Aberrationen (Abbildungsfehler, Brechungsfehler) auf. Die Ursachen dafür sind vielfältig. Dichteunterschiede oder unregelmäßige Formen der Grenzflächen des optischen Apparates können zum Beispiel Wellenfrontaberrationen hervorrufen.

Es wird zwischen chromatischen und monochromatischen Aberrationen unterschieden [Mrochen und Seiler 2001 b]. Chromatische Brechungsfehler entstehen, weil die Linse die verschiedenen Farben, aus denen das weiße Licht zusammengesetzt ist, wellenlängenabhängig in verschiedenen Winkeln bricht. Auf diese Abbildungsfehler wird nicht näher eingegangen, da es bei den auszuwertenden eigenen Untersuchungen vorrangig um die monochromatischen Aberrationen geht. Aberrationen führen zu einer Verwaschung eines wahrgenommenen punktförmigen Objektes [Bühren und Kohnen 2007 a]. Dementsprechend ist auch die Wellenfront verändert (siehe Abb. 3). Es resultiert der sogenannten Wellenfrontfehler oder auch Wellenfrontdeformation genannt. Je geringer die Aberrationen sind, desto besser ist die optische Qualität des Systems.

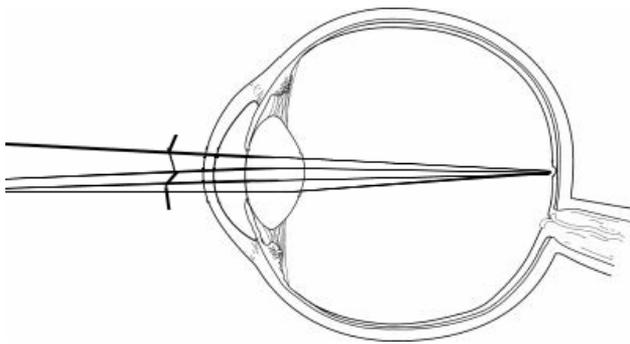


Abb. 3: Aberrierte Wellenfront

Die routinemäßig erfassten Aberrationen sind als sphärische und zylindrische Brechungsfehler bei der Myopie, Hyperopie und dem Astigmatismus bekannt. Sie bilden den Großteil der Abbildungsfehler und können mittels sphärischer und zylindrischer Gläser kompensiert werden.

1.3.1 Myopie

Es besteht ein Missverhältnis bezüglich Achsenlänge und Brechkraft des Auges (siehe Abb. 4, S. 4), so dass der Brennpunkt parallel einfallender Lichtstrahlen vor der Netzhaut liegt [Sachsenweger et al. 2003]. Ursache können eine Achsenmyopie (normale Brechkraft, zu langer Augapfel) oder eine Brechungsmyopie (normale Achsenlänge, zu große Brechkraft) sein [Sachsenweger et al. 2003]. Aus beidem resultiert auf der Netzhaut ein unscharfes, verwaschenes Bild.

Die Wellenfront im myopen Auge ist stärker gekrümmt, da die Lichtstrahlen stärker konvergieren als im idealen Auge [Bühren und Kohnen 2007 a]. Die Korrektur erfolgt durch Konkavlinsen (Zerstreuungslinsen), mit deren Hilfe parallel einfallende Lichtstrahlen auf der Netzhaut gebündelt werden.

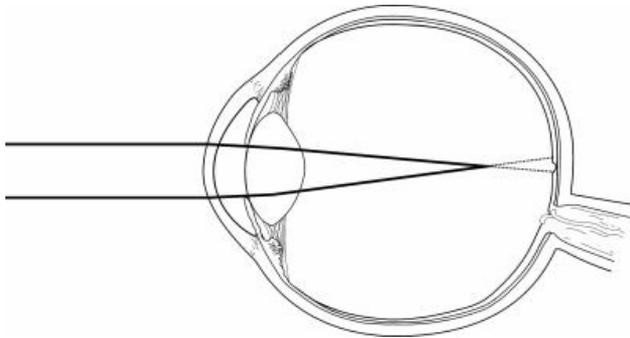


Abb. 4 : Strahlengang bei Myopie (http://www.uniklinikum-regensburg.de/kliniken-institute/Augenheilkunde/Informationen_f__r_Patienten/Refraktive_Chirurgie/Fehlsichtigkeiten/Kurzichtigkeit/index.php)

1.3.2 Hyperopie

Bei der Hyperopie (siehe Abb. 5) führt das Missverhältnis zwischen Achsenlänge und Brechkraft des Auges zu einer Brennpunktverlagerung parallel einfallender Lichtstrahlen hinter die Netzhaut [Sachsenweger et al. 2003]. Grund dafür kann eine Achsenhyperopie (normale Brechkraft, zu kurze Augenachse) oder eine Brechungshyperopie (normale Achsenlänge, zu geringe Brechkraft) sein. Auf der Netzhaut entsteht demzufolge ein nur unscharfes Bild. Die Wellenfront ist schwächer gekrümmt [Bühren und Kohnen 2007 a]. Die Korrektur erfolgt durch Konkavlinsen (Sammellinsen), mit deren Hilfe der Brennpunkt parallel einfallende Lichtstrahlen auf die Netzhaut gebündelt werden.

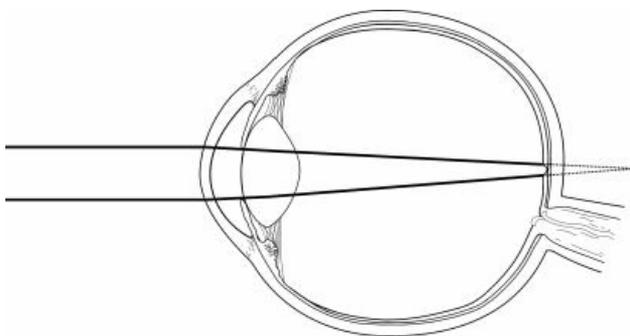


Abb. 5: Strahlengang bei Hyperopie (http://www.uniklinikum-regensburg.de/kliniken-institute/Augenheilkunde/Informationen_f__r_Patienten/Refraktive_Chirurgie/Fehlsichtigkeiten/Weitsichtigkeit/index.php)

1.3.3 Astigmatismus

Der Astigmatismus wird als eine Krümmungsanomalie der brechenden Medien definiert. Beim regulären Astigmatismus haben die horizontale und die vertikale Ebene unterschiedliche Brechkräfte (siehe Abb. 6). Beim irregulären Astigmatismus sind Wölbung und Brechkraft der brechenden Medien völlig unregelmäßig. Als Folge davon wird ein punktförmiges Objekt strich- bzw. stabförmig auf der Netzhaut abgebildet [Sachsenweger et al. 2003]. Mit Hilfe von zylindrischen Gläsern wird die Krümmung korrigiert und ein punktförmiges Objekt nicht mehr verzogen wahrgenommen.

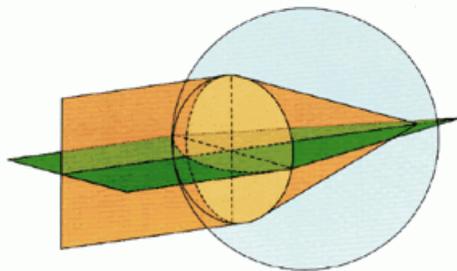


Abb. 6: Astigmatismus (http://www.uniklinikum-regensburg.de/kliniken-institute/Augenheilkunde/Informationen_f__r_Patienten/Refraktive_Chirurgie/Fehlsichtigkeiten/Hornhautverkr__mmung/index.php)

1.3.4 Emmetropie

Emmetropie (Rechtsichtigkeit) ist jedoch nicht gleichbedeutend mit dem idealem Auge. Sie beschreibt lediglich ein ausgeglichenes Verhältnis der Achsenlänge des Auges und der Brechkraft seiner brechenden Medien [Sachsenweger et al. 2003]. Unter diesen Bedingungen werden parallel ins Auge einfallende Lichtstrahlen ohne Zuhilfenahme von Gläsern auf die Netzhaut gebündelt und es entsteht ein scharfes Bild.

1.3.5 Aberrationen höherer Ordnung

Die Gesamtheit der monochromatischen Brechungsfehler, die das Auge beeinflussen, ist aber weitaus komplexer. Neben den bereits aufgeführten sphärischen und zylindrischen Abbildungsfehlern existieren noch weitere Aberrationen. Zur Beschreibung der verschiedenen Abbildungsfehler werden gegenwärtig vorwiegend die vom niederländischen Mathematiker und Physiker Frits Zernike (1888-1966) formulierten Kreispolynome verwendet, mit deren Hilfe

eine detailliertere Untersuchung des Einflusses der Deformation auf die optische Qualität möglich wurde. Für die klinische Praxis werden nur die ersten 20 Polynome (0.-5. Ordnung) verwendet [Kohnen und Bühren 2004 b]. Diese Zernike-Polynome lassen sich in Form einer Pyramide darstellen (siehe Abb. 7). Dabei stehen die sphärischen Abbildungsfehler mehr im Zentrum und die astigmatischen Aberrationen mehr am Rand. Der Einfluß des jeweiligen Polynoms auf den subjektiven Seheindruck lässt erkennen, dass mehr zentral stehende Aberrationen einen größeren Einfluß als peripher stehende aufweisen [Applegate et al. 2002].

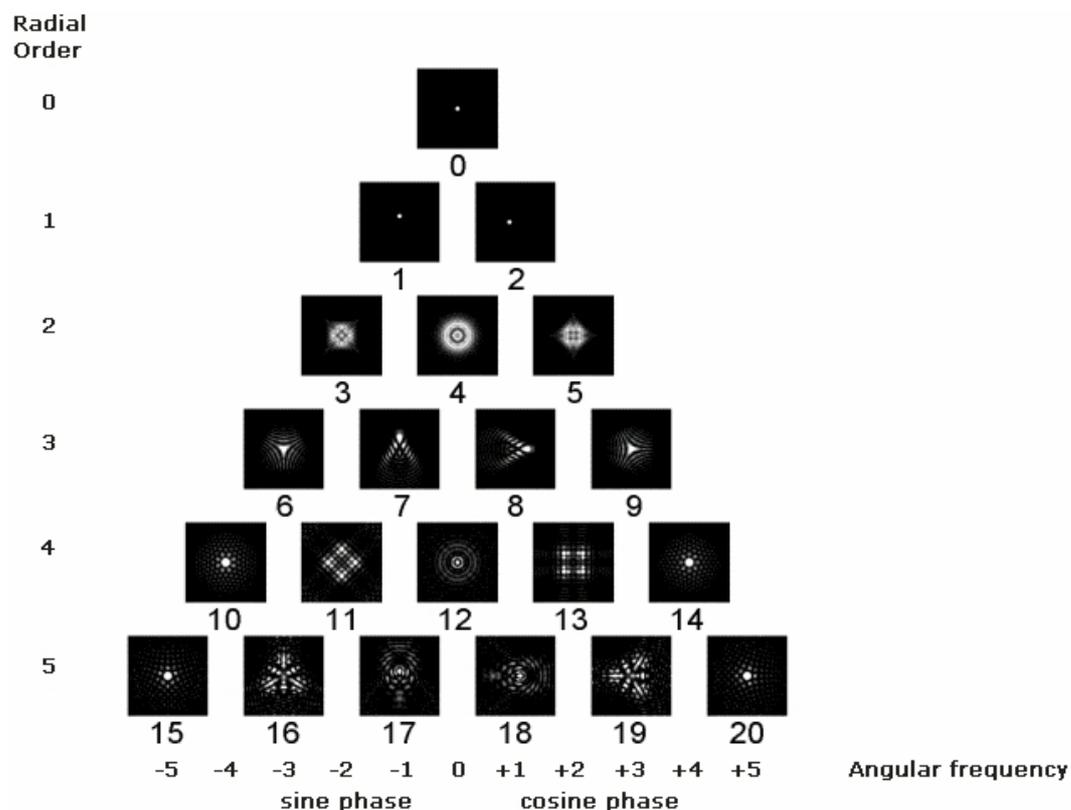


Abb. 7: Zernike Pyramide (modifiziert nach C. of Williams Lab-CVS)

- | | |
|---------------------------|--|
| 0 = „piston“ | 10 = Quadrafoil horizontal |
| 1 = Verkippung horizontal | 11 = sekundärer Astigmatismus horizontal |
| 2 = Verkippung vertikal | 12 = sphärische Aberrationen |
| 3 = Astigmatismus 45° | 13 = sekundäre Astigmatismus vertikal |
| 4 = Power | 14 = Quadrafoil vertikal |
| 5 = Astigmatismus 0° | 15 = Pentafoil horizontal |
| 6 = Trefoil horizontal | 16 = sekundärer Trefoil horizontal |
| 7 = Koma horizontal | 17 = sekundäres Koma horizontal |
| 8 = Koma vertikal | 18 = sekundäres Koma vertikal |
| 9 = Trefoil vertikal | 19 = sekundärer Trefoil vertikal |
| | 20 = Pentafoil vertikal |

Die Brechungsfehler 0. bis 2. Ordnung werden auch als Aberrationen niedriger Ordnung (lower order aberrations) bezeichnet. Für die 0. Ordnung wird in der Wellenfrontterminologie der englische Begriff „piston“ verwendet. Sie beschreibt die Stellung im Raum. Die Fehler der 1. Ordnung bezeichnet man als prismatische Brechungsfehler (Verkippung). Die Polynome der 0. und 1. Ordnung haben laut Thibos [2001] keinen Einfluß auf die optische Qualität in monochromatischem Licht. Deshalb wird in dieser Arbeit nicht weiter auf sie eingegangen.

In der 2. Ordnung befinden sich die im vorherigen Abschnitt bereits behandelten sphärischen und zylindrischen Abbildungsfehler. In der Wellenfrontterminologie wird anstelle von Sphäre von Defokus gesprochen, um Verwechslungen mit den sphärischen Aberrationen höherer Ordnung zu vermeiden (4. Ordnung). Die Brechungsfehler niedriger Ordnung können durch entsprechende Gläser ausgeglichen werden.

Abbildungsfehler, die der 3. bis 5. Ordnung zugeordnet sind, werden Aberrationen höherer Ordnung (higher order aberrations) genannt. Sie sind nicht durch Brillengläser oder Kontaktlinsen korrigierbar. Der wichtigste Vertreter der 3. Ordnung ist das Koma. Das Koma (vom griechischen Begriff für Schweif abgeleitet) ist eine asymmetrische Verteilung des Brechwertes entlang einer durch das Pupillenzentrum verlaufenden Achse. Entsprechend der Achse wird zwischen vertikalem (entlang der y-Achse) und horizontalem (entlang der x-Achse) Koma unterschieden. Zur 3. Ordnung zählt auch der Trefoil, der dreistrahlige Astigmatismus, mit der Basis jeweils auf der x-Achse und der y-Achse. Wesentlich in der 4. Ordnung ist die sphärische Aberration. Sie stellt eine rotationssymmetrisch verteilte Abweichung der Brechkraft der peripheren von der zentralen Pupille dar. Darüber hinaus sind Quadrafoil sowie der sekundäre Astigmatismus der 4. Ordnung zuzuordnen. Die 5. Ordnung besteht aus dem sekundären Koma, dem sekundären Trefoil und dem Pentafoil. Die eigenen Untersuchungen beinhalten hauptsächlich das Koma und die sphärische Aberration, weshalb an dieser Stelle nicht detaillierter auf die übrigen Aberrationen höherer Ordnung eingegangen wird.

1.3.6 Messung der Wellenfrontdeformation

Durch die Aberrometrie (Messung der Wellenfrondeformation) ist es möglich, auch Refraktionsfehler, welche nicht mithilfe von Brillen oder Kontaktlinsen ausgleichen werden können, zu erfassen, und damit die Sehqualität des menschlichen Auges einschätzen zu können. Um die Gesamtheit der Aberrationen zu messen, wird eine ebene Wellenfront in das Auge eingestrahlt und deren Verformung beim Verlassen des Auges gemessen. Eine weit verbreitete Methode der Aberrometrie ist die nach Hartmann-Shack [Kohnen und Bühren 2004 b]. Dabei wird ein Laserstrahl mit Hilfe eines optischen Systems so auf die Fovea fokussiert, dass diese Stelle schließlich als indirekte Lichtquelle dient. Das Licht wird von der Netzhaut reflektiert und passiert Linse und Hornhaut, wodurch die Wellenfront verändert wird. Beim Austritt der deformierten Wellenfront aus dem Auge wird diese letztlich mit Hilfe eines Mikrolinsenarrays erfasst und anhand der Abstände zwischen den Messpunkten analysiert. Anhand der gemessenen Werte ist es möglich, die Deformation als Messwert oder als sogenanntes theoretisches retinales Bild darzustellen. Dieses erzeugte Bild wird auch als point-spread-function (PSF) bezeichnet, denn ein reales optisches System wie das menschliche Auge bildet einen Lichtpunkt als verschmierten Punkt ab [Mrochen und Seiler 2001 b]. Je kleiner die point-spread-function, desto besser ist die optische Qualität des Auges (siehe Abb. 8).

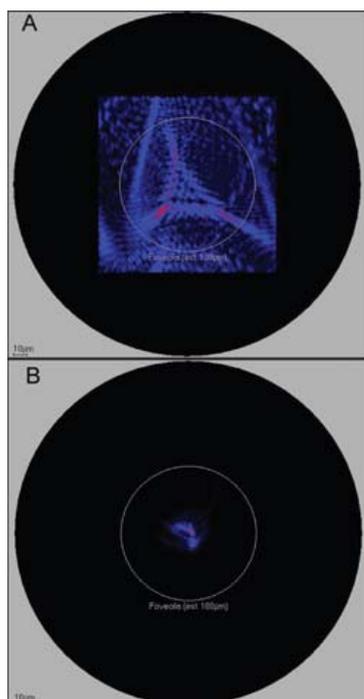


Abb. 8: point spread function = PSF
(from David A. Berntsen)
A = PSF eines Auges mit vielen Aberrationen
B = PSF eines Auges mit wenig Aberrationen

1.4 Optische Qualitäten

Die Formulierung „Sehvermögen“ bezeichnet die Gesamtleistung des Sehorgans, die sich aus Lichtsinn, Sehschärfe, Farbsehen und Gesichtsfeld zusammensetzt [Sachsenweger et al. 2003]. Farbsehen und Gesichtsfeld seien hier nur der Vollständigkeit halber mit erwähnt. Auf sie wird nicht näher eingegangen, da sie nicht Gegenstand dieser Untersuchungen sind.

1.4.1 Lichtsinn

Tagsehen (photopisches Sehen) besteht bei einer Gesichtsfeldleuchtdichte von über 10 cd/m², Dämmerungssehen (mesopisches Sehen) zwischen 0,01 und 10 cd/m² und Nachtsehen (skotopisches Sehen) bei einer Gesichtsfeldleuchtdichte unter 0,01 cd/m² [Sachsenweger et al. 2003].

Als Blendung wird eine passagere Störung des Adaptationszustandes der Netzhaut bezeichnet. Ursache ist eine Übersteuerung der auf eine geringere Leuchtdichte eingestellten Netzhaut. Als Folge kommt es zu einer passageren Visusminderung [Sachsenweger et al. 2003].

1.4.2 Sehschärfe

Die Sehschärfe (bestkorrigierter Visus) ist das Auflösungsvermögen des Auges bei optimaler Korrektur von Brechungsfehlern. Abzugrenzen ist hiervon das Auflösungsvermögen des Auges ohne optische Hilfsmittel (unkorrigierter Visus) [Sachsenweger et al. 2003]. Der minimale Abstand zweier Punkte, die bei optimaler Korrektur von Brechungsanomalien noch getrennt wahrgenommen werden, wird als Minimum separabile (minimaler Auflösungswinkel) bezeichnet. Als volle Sehschärfe ist ein Visus von 1,0 festgelegt worden [Sachsenweger et al. 2001]. Die Sehschärfe ist abhängig von der Helligkeit. Bei einer Leuchtdichte zwischen 100 und 10.000 cd/m² ist die Sehschärfe optimal. Bei der klassischen Visusprüfung werden Hochkontrastobjekte, schwarze Optotypen (Sehzeichen) auf weißem Untergrund, bei standardisierter Raumbelichtung verwendet.

Das Kontrastsehen bezeichnet die Fähigkeit Optotypen, Streifen- oder Schachbrettmuster abnehmenden Kontrasts zur Umgebung wahrzunehmen.

1.5 LASIK

1.5.1 Ablauf der LASIK

Die laserassistierte-in-situ-Keratomileusis (griech. keras= Horn, smileusis = schnitzen) ist eine chirurgische Möglichkeit der Korrektur von Fehlsichtigkeiten mittels eines Excimer-Lasers.

Der Bulbus wird durch das Aufsetzen eines Saugrings stabilisiert. Mit einem Mikrokeratom wird ein oberflächenparalleles Hornhautscheibchen (ein sogenannter Flap) präpariert (siehe Abb. 9a). Das Mikrokeratom besitzt eine oszillierende Klinge, die automatisch vorgeschoben wird. Der Flap wird nicht vollständig abgetrennt, sondern es verbleibt ein Gewebesteg (der sogenannte Hinge), an dem der Flap wie ein Deckel zu Seite geklappt wird. Daraufhin erfolgt die Laserablation im Hornhautstroma (siehe Abb. 9b). Während des Laser-Vorganges gewährleisten sogenannte Eyetracker die korrekte Zentrierung des Lasers. Es handelt sich hierbei um Kamerasysteme, die Bewegungen des Augapfels wahrnehmen und den Laser daraufhin auf die neue Position ausrichten. Nach Beendigung des Laser-Vorganges wird der Flap wieder zurückgeklappt und das Wundbett gründlich ausgespült. Da sich der Flap von selbst festsaugt, bedarf es keiner Naht. Ein Verband ist ebenfalls nicht notwendig, da bereits der Flap wie ein Verband fungiert und das Wundbett vollständig bedeckt (siehe Abb. 9c).

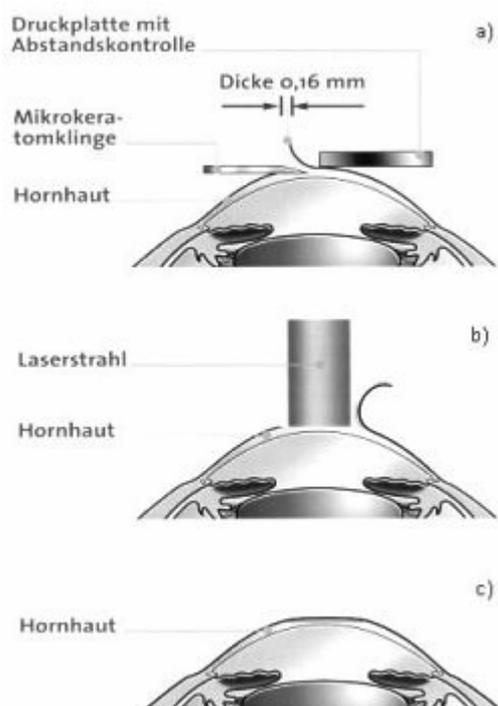


Abb. 9: Ablauf der LASIK
(<http://www.klinikum-karlsruhe.com/?id=296>)

1.5.2 Lasertechnik

Der Begriff „Excimer“ ist abgeleitet von „excited dimer“. Ein Dimer (griech., Zweikomponentenverbindung) entsteht in einer Gasmischung aus Fluor und Argon in einem starken elektrischen Feld. Es kommt zu einem Zerfall des angeregten, instabilen Argon-Fluorid-Moleküls. Dabei wird ultraviolette Strahlung von 193 nm mit einer Photonenenergie von 6,4 Elektronenvolt pro Photon emittiert. Diese Strahlung wird über ein Spiegelsystem in eine monochromatische Strahlung umgewandelt und ist in der Lage corneale Molekülverbindungen aufzubrechen. Mit dem Aufbrechen der Molekülbrücken entsteht ein Kollagenplasma. Dabei werden entstehende „Bruchstücke“ mit mehrfachen Schallgeschwindigkeit weggeschleudert und es kommt zu einem Gewebeabtrag. Da es dabei kaum zu einer Temperaturerhöhung angrenzenden Corneagewebes kommt, spricht man auch vom „kalten“ Laser [Duncker et al. 2001].

1.5.3 Konventionelle LASIK, Wellenfrontgeführte LASIK

Gegenwärtig stehen mehrere Laserverfahren mit unterschiedlichen Ablationsprofilen zur Verfügung. Der sphäro-zylindrischen Standardablation der Hornhaut bei der konventionellen LASIK steht z.B. das individualisierte Abtragsprofil der wellenfrontgeführten LASIK gegenüber. Bei der konventionellen LASIK wird das Ablationsprofil nur durch die präoperativen Aberrationen der zweiten Ordnung bestimmt. Im Gegensatz dazu wird bei der wellenfrontgeführten LASIK die Gesamtheit der präoperativ gemessenen Aberrationen, also auch die Aberrationen höherer Ordnung, in das Abtragsprofil integriert.

1.6 Fragestellung

Ziel jeder refraktiv-chirurgischen Operation ist die Korrektur von Defokus und Astigmatismus (Brechungsfehler 2. Ordnung), um dem Patienten einen adäquaten Seheindruck ohne Korrekturhilfen (Brille, Kontaktlinse) zu ermöglichen. Refraktiv-chirurgische Operation verändern aber auch die Brechungsfehler höherer Ordnung und können dadurch Einfluss auf den postoperativen Seheindruck haben. Durch die Operation selbst werden Aberrationen höherer Ordnung v.a. sphärische Aberrationen induziert. Ursache dieser mit zunehmender Korrekturhöhe immer stärker werdenden Induktion ist die

zentrale Abflachung der Hornhaut durch die Ablation bei Korrektur einer Myopie [Yoon et al. 2005]. Aus der Literatur ist bekannt, dass die Zunahme von Aberrationen höherer Ordnung die Kontrastwahrnehmung beeinträchtigen kann [Holladay et al. 1999, Mrochen et al. 2000, Yamane et al. 2004, Quesnel et al. 2004, Kim et al. 2004, Kaisermann et al. 2004, Hammer et al. 2004]. Diese Zunahmen sind nach konventioneller LASIK-Behandlung beschrieben worden [Holladay et al. 1999, Kim et al. 2004, Kaisermann et al. 2004, Yamane et al. 2004, Quesnel et al. 2004]. Des Weiteren berichteten Knorz et al. [1999] über eingeschränktes Dämmerungssehen nach konventioneller LASIK. Wellenfrontgeführte LASIK-Behandlungen, die die gesamten präoperativ gemessenen Aberrationen in das Ablationsprofil einbeziehen, haben das Ziel, den postoperativen Wellenfrontfehler zu reduzieren und damit einen verbesserten Seheindruck ermöglichen. Nach Einsatz erster wellenfrontgeführter LASIK-Behandlungen berichteten Seiler et al. [2000] über Sehschärfen bis zu 2,0. So stellt sich die weiterführende Frage, ob die wellenfrontgeführte LASIK mit ihrem individualisierten Abtragungsprofil gegenüber der konventionellen LASIK einen Vorteil aufweist.

2. Ziele

Ziel der Untersuchungen ist es, herauszufinden, wie die Wellenfront des optischen Systems „Auge“ durch eine LASIK-Operation verändert wird und ob diesbezüglich Unterschiede zwischen der konventionellen und der wellenfrontgeführten LASIK bestehen. Neben diesen messbaren physikalischen Parametern sollen beide LASIK-Methoden hinsichtlich Visus, Dämmerungssehen, Blendungsempfindlichkeit und Kontrastsensitivität untersucht werden. Darüber hinaus sind diese Kriterien im Bezug auf die Höhe der präoperativ zu korrigierenden Myopie zu überprüfen. Da mit steigender Myopie der zentrale Gewebeabtrag größer wird und somit stärkere Auswirkungen auf die Wellenfront-Deformation zu erwarten sind, werden zur besseren Vergleichbarkeit der Ergebnisse zwei Behandlungsgruppen (Niedrigmyop: -1,0 dpt bis -5,0 dpt SÄ; Hochmyop: -5,1 dpt bis -10,5 dpt SÄ) gebildet. Diese Unterteilung hat sich, wie auch von Knorz et al. [1999] publiziert, bewährt.

3. Patienten und Methode

3.1 Patienten

Es wurde eine prospektive, monozentrische klinische Untersuchung im Zeitraum von Februar 2004 bis Juli 2005 durchgeführt. Dazu wurden 116 myope Augen von 63 Patienten untersucht, die mit der LASIK-Technik an der Klinik und Poliklinik für Augenheilkunde der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg (Direktor: Prof. Dr. med. habil. G.I.W. Duncker) operiert wurden. Nur Patienten mit einer Myopie oder einer Myopie mit kombiniertem Astigmatismus wurden in diese Studie aufgenommen. Die Spannbreite der Myopien reichte von -1,6 dpt bis -10,4 dpt SÄ. Das postoperative Follow-up für die durchgeführten Untersuchungen betrug im Durchschnitt $6,2 \pm 0,4$ Monate. Dieser Zeitpunkt wurde gewählt, um heilungsbedingte Veränderungen und Schwankungen der Untersuchungsparameter, wie sie in den ersten Wochen und Monaten nach einer LASIK-Operation auftreten können, abzuwarten, um damit weitgehend stabile Meßdaten zu erhalten. Die präoperative Myopie betrug im Durchschnitt $-4,55 \pm 1,83$ dpt SÄ für die konventionelle LASIK ($n = 58$) und $-5,93 \pm 1,82$ dpt SÄ für die wellenfrontgeführte LASIK ($n = 58$). Der jeweilige Einschluß der Patienten in eine der beiden Behandlungsgruppen erfolgte in Abhängigkeit vom Wunsch des Patienten nach der einen oder der anderen Behandlungsoption. Dabei wurden ggf. rechte und linke Augen auch mit unterschiedlichen Verfahren behandelt. Da hierbei kein Grenzwert für ein Einschlusskriterium festgelegt wurde, ist von einer annähernd zufälligen Verteilung auszugehen (vgl Tab. 1-6, S. 13-15 sowie Abb. 12, S. 15).

Tab. 1: Ausgangslage Konventionelle LASIK, gesamte Gruppe

	Alter in Jahren	Myopie in dpt	Astigmatismus in dpt	Sphärisches Äquivalent in dpt
N				
Gültig	58	58	58	58
Fehlend	0	0	0	0
Mittelwert	35,16	-4,2284	-,6466	-4,55172
Standardabweichung	8,998	1,87217	,75078	1,828747
Minimum	21	-8,25	-3,50	-9,375
Maximum	56	,00	,00	-1,750

Tab. 2: Ausgangslage Wellenfrontgeführte LASIK, gesamte Gruppe

		Alter in Jahren	Myopie in dpt	Astigmatismus in dpt	Sphärisches Äquivalent in dpt
N	Gültig	58	58	58	58
	Fehlend	0	0	0	0
Mittelwert		35,75	-5,4767	-,9138	-5,93362
Standardabweichung		9,038	1,67170	,92782	1,818904
Minimum		20	-10,00	-4,25	-10,375
Maximum		56	-1,50	,00	-1,625

Tab. 3: Ausgangslage Konventionelle LASIK, Gruppe Niedrigmyop

		Alter in Jahren	Myopie in dpt	Astigmatismus in dpt	Sphärisches Äquivalent in dpt
N	Gültig	37	37	37	37
	Fehlend	0	0	0	0
Mittelwert		35,33	-3,1149	-,6959	-3,46284
Standardabweichung		8,727	1,21563	,79742	1,148242
Minimum		21	-5,00	-3,50	-5,000
Maximum		56	,00	,00	-1,750

Tab. 4: Ausgangslage Konventionelle LASIK, Gruppe Hochmyop

		Alter in Jahren	Myopie in dpt	Astigmatismus in dpt	Sphärisches Äquivalent in dpt
N	Gültig	21	21	21	21
	Fehlend	0	0	0	0
Mittelwert		34,86	-6,1905	-,5595	-6,47024
Standardabweichung		9,669	,99657	,67038	1,048738
Minimum		22	-8,25	-2,25	-9,375
Maximum		51	-4,50	,00	-5,250

Tab. 5: Ausgangslage Wellenfront-LASIK, Gruppe Niedrigmyop

		Alter in Jahren	Myopie in dpt	Astigmatismus in dpt	Sphärisches Äquivalent in dpt
N	Gültig	18	18	18	18
	Fehlend	0	0	0	0
Mittelwert		34,75	-3,7083	-,5417	-3,97917
Standardabweichung		8,456	,92851	,37622	,873686
Minimum		20	-5,00	-1,25	-5,000
Maximum		50	-1,50	,00	-1,625

Tab. 6: Ausgangslage Wellenfront-LASIK, Gruppe Hochmyop

		Alter in Jahren	Myopie in dpt	Astigmatismus in dpt	Sphärisches Äquivalent in dpt
N	Gültig	40	40	40	40
	Fehlend	0	0	0	0
Mittelwert		36,20	-6,2725	-1,0813	-6,81313
Standardabweichung		9,357	1,27113	1,05062	1,395080
Minimum		22	-10,00	-4,25	-10,375
Maximum		56	-4,25	,00	-5,125

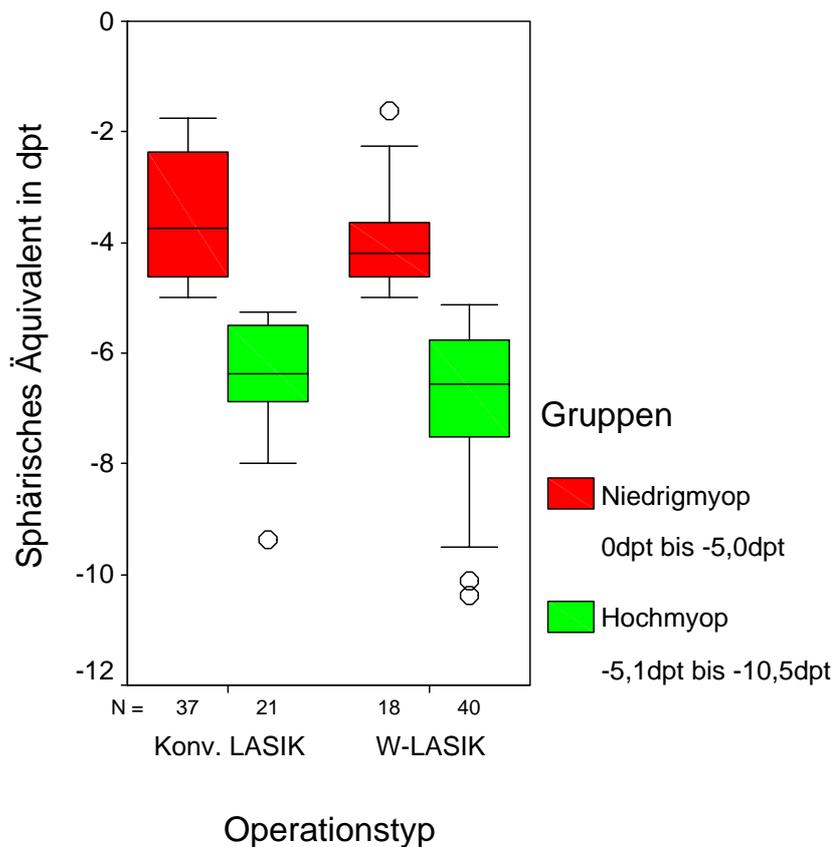


Abb. 12: Ausgangslage Sphärisches Äquivalent (Kreis = Ausreißer)

3.2 Methode

Die konventionelle wie auch die wellenfrontgeführte LASIK erfolgte mit dem Keracor 217z-Excimer-Laser (Fa. Bausch&Lomb). Alle LASIK-Operationen wurden ausschließlich von den selben zwei in der Methode erfahrenen Ophthalmo-Chirurgen durchgeführt.

In dieser zweiarmigen Beobachtungsstudie wurde an allen Patientenaugen (n = 116) prä- und postoperativ der unkorrigierte und korrigierte Visus, die Aberrationen sowie das Dämmerungssehen und die Blendungsempfindlichkeit erfaßt. Des Weiteren beinhaltete die Untersuchung eine Biomikroskopie des vorderen und hinteren Augenabschnitts und eine applanatorische Augeninnendruckmessung.

Im zweiten Teil der Untersuchung (n = 45) wurden an einer kleineren Patientengruppe zusätzlich zu den oben genannten Kriterien noch prä- und postoperative Kontrollen des Kontrastsehens vorgenommen.

Die Teilnahme an der Untersuchung war freiwillig. Bei allen Patienten lag die ausdrückliche Einwilligung vor. Sie wiesen eine seit 2 Jahren stabile Refraktion auf, zeigten keine pathologischen okulären Veränderungen und hatten bisher noch keine Augenoperation.

3.2.1 Aberrometrie

Die prä- und postoperativen Wellenfront-Deformationen des gesamten Auges wurden mit dem Zywave-Aberrometer (Fa. Bausch&Lomb), das auf dem Hartmann-Shack-Prinzip beruht, erhoben. Die Messungen erfolgten fünfmal pro Auge. Aus den drei validesten Messungen (Auswahl anhand eines gerätespezifischen Reliability-Coefficient-Wertes) wurde der Mittelwert berechnet. Um mögliche Akkommodationseinflüsse bei der Messung zu verhindern, erfaßte das Gerät die Refraktion des zu untersuchenden Auges und ermittelte die Wellenfront im desakkommodierten Zustand. Dabei wurden alle Einzelaberrationen (Zernike-Polynome) der 2.-5. Ordnung registriert. Darüber hinaus wurde für alle Aberrationen höherer Ordnung (3.-5. Ordnung) für eine 6-mm-Pupille der HO-RMS (high order root mean square) - Wert berechnet. Dieser Zahlenwert (auch Wellenfrontfehler genannt) stellt die Quadratwurzel aus der Summe der Quadrate der einzelnen Aberrationen 3.-5. Ordnung dar und ist somit ein Anhaltswert für die Gesamtheit der höheren Aberrationen.

Für diese Untersuchung wurden die Pupillen mit Neosynephrin-Augentropfen dilatiert. Dieses Vorgehen erfolgte aufgrund der Ergebnisse früherer Aberrometriemessungen unter der Verwendung verschiedener Mydriatika [Gießler et al. 2002].

3.2.2 Visus

Die Sehschärfe für die Ferne wurde monokular sowohl unkorrigiert (Sehschärfebestimmung ohne Brille/Kontaktlinsen) als auch bestkorrigiert (Sehschärfebestimmung mit Brille/Kontaktlinsen) auf einer 5-m-Distanz anhand von Zahlen erhoben.

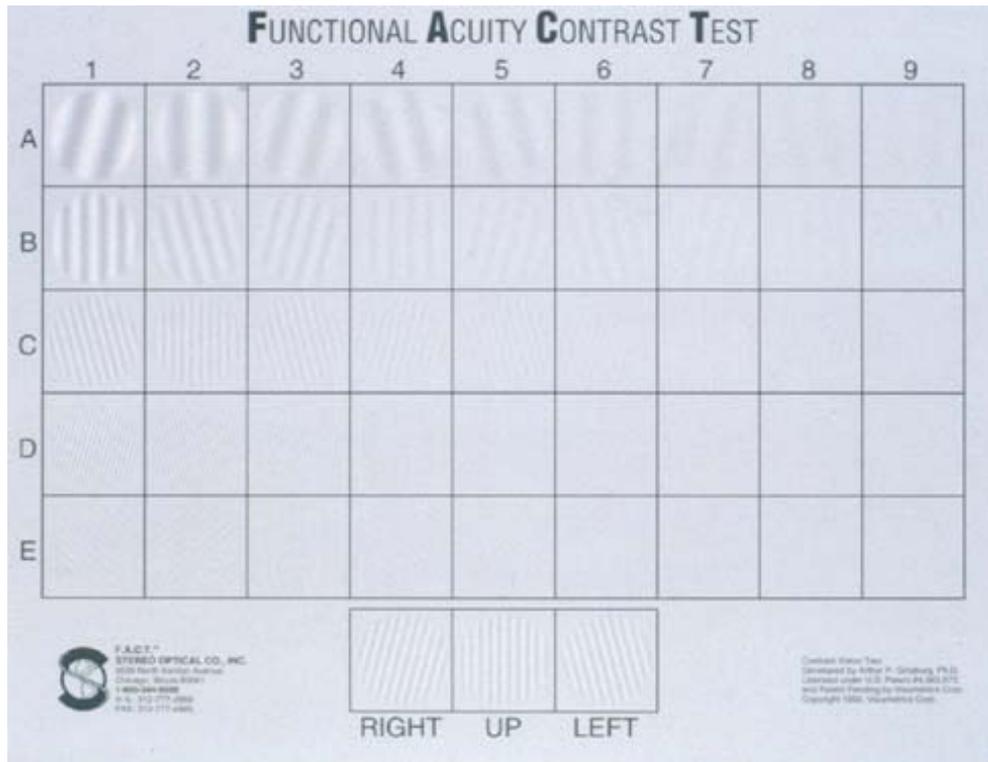
3.2.3 Dämmerungssehen, Blendungsempfindlichkeit

Die Untersuchung des Dämmerungssehens und der Blendungsempfindlichkeit erfolgte mit dem Mesotest II (Fa. Oculus) im abgedunkelten Raum. Nach einer Dunkeladaptation von 10 min wurden dem Patienten monokular Landolt-Ringe 4 verschiedener Kontraststufen (1:23; 1:5; 1:2,7; 1:2) angeboten. Im ersten Teil erfolgte dieser Test ohne Blendungslicht. Beim zweiten Teil wurden dieselben Kontraststufen mit einem zusätzlichen Blendungslicht demonstriert, was ergänzende Aussagen über die Blendungsempfindlichkeit zulässt.

3.2.4 Kontrastsensitivität

Mit dem Test der Kontrastsensitivität wurde geprüft, bis zu welcher Schwelle der Patient Streifenmuster abnehmenden Kontrasts zur Umgebung wahrnehmen kann. Die Untersuchung der Kontrastsensitivität erfolgte mit dem digitalen Contrast Sensitivity Tester Modell 1800 Digital™ (CST 1800D) und dem Functional Acuity Contrast Test – Chart (F.A.C.T.) für Kontrastempfindlichkeit. Die Kontrastmessung wurde monokular unter photopischen (85 cd/m²) und mesopischen (3 cd/m²) Bedingungen durchgeführt. Der dabei verwendete Testchart ermöglichte es, ein gleichgroßes Streifenmuster bei abnehmenden Kontrast (horizontal) und immer enger werdenden Streifenmuster mit konstantem Kontrast (vertikal) dem Patienten anzubieten (siehe Abb. 10, S. 18). Durch dieses Sinuswellenmuster konnten Ortsfrequenzen von 1,5; 3; 6; 12 und 18 cycles per degree (Periode/ Grad) erfasst werden. Dabei gab es 3 verschiedene Ausrichtungen des Streifenmusters (+15°, 0°, -15°). Der Patient wurde auf jeder Ortsfrequenz Kästchen für Kästchen (Kontrast abnehmend) nach der korrekten Ausrichtung gefragt. Jedem einzelnen Testfeld war eine Wertigkeit durch einen sogenannten F.A.C.T.- Score hinterlegt. Die Wertigkeit war von der Ortsfrequenz und dem Kontrast abhängig. Für jede Ortsfrequenz existierte eine eigene exponentielle Funktion, mit der die Wertigkeit für den entsprechenden Kontrast

ermittelt wurde. Dadurch war es möglich, eine Kontrastempfindlichkeitsfunktion ähnlich der aus der Akustik bekannten „Hörkurve“ aufzunehmen (siehe Abb. 11). Die Untersuchung wurde präoperativ bestkorriert durchgeführt und postoperativ ohne Korrektur, so wie es auch Quesnel et al. [2004] in ihrer Studie über Kontrastsensivitätstests mit dem Vector Vision CSV-1000 System publiziert haben. Sie beschrieben keinen signifikanten Unterschied zwischen der postoperativen Messung des Kontrastsehens mit und ohne Korrektur.



IOC Ginsburg: Figure 1. FACT contrast sensitivity chart having ANSI standard linear sine-wave gratings.

© 2007 Vision Sciences Research Corp. All Rights reserved.

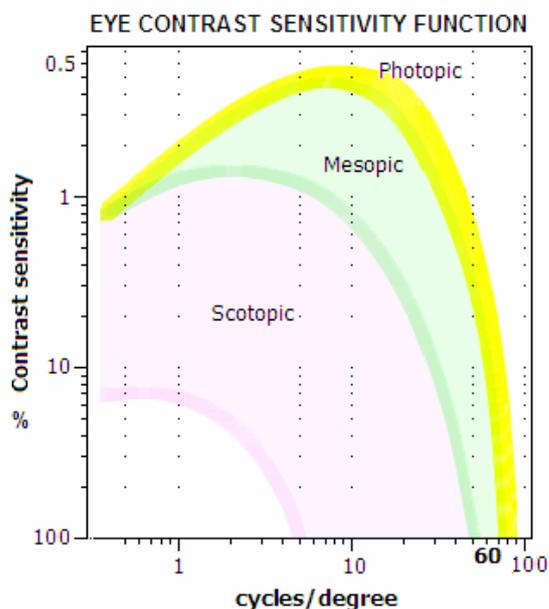


Abb. 10 (oben): Testchart des Kontrastsensivitätstests

Abb. 11 (links): Kontrastsensivitätskurven (www.telescope-optics.net/images/contrast2.PNG)

3.2.5 Fragebogen

Zur Erhebung der subjektiven Sehqualität wurden die Patienten gebeten, bei der postoperativen Kontrolluntersuchung einen Fragebogen auszufüllen. Da bisher noch kein standardisierter Fragebogen für die Erhebung der subjektiven Sehqualität nach LASIK-Operation existiert [Kohnen et al. 2006], wurde der Fragebogen (siehe im Anhang S. 61-62) eigens für diese Studie analog zu standardisierten Fragebögen aus anderen Fachbereichen entworfen. Die Patientenbefragung erfolgte speziell zu den Schwerpunkten Dämmerungssehen, Blendempfindlichkeit und Kontrastsehen.

3.2.6 Statistische Analyse

Alle statistischen Berechnungen erfolgten mit dem SPSS-Programm Version 11.5. Rechte und linke Augen wurden unabhängig voneinander analysiert, da das präoperative Aberrationsmuster zwischen beiden Augen nicht notwendiger Weise symmetrisch ist und die Operation für jedes Auge unabhängig durchgeführt wurde [Moreno-Barriuso et al. 2001].

Der statistischen Vergleich der präoperativen Werte gegenüber den postoperativen Werten des Visus, der Kontrastsensitivität und der Aberrometrie wurde mit dem Wilcoxon-Test diskutiert. Der Mann-Whitney-U-Test wurde für die statistische Untersuchung der Werte zwischen den beiden Ablationsprofilen angewandt. Bei der statistischen Analyse des Dämmerungssehens und der Blendempfindlichkeit kam der McNemar-Test zur Anwendung. Eine Normalverteilung der Messwerte wurde bei allen durchgeführten Tests nicht vorausgesetzt. Es wurde ein Signifikanzniveau von 0,05 festgelegt, d.h., dass ein Ergebnis als signifikant akzeptiert wird, das rein zufällig nur in 5 Prozent in den Stichprobenziehungen auftreten würde.

Die graphische Darstellung der Ergebnisse erfolgte mit dem SPSS Programm Version 11.5 und dem Windows Excel Programm 2000.

4. Ergebnisse

4.1.1 Wellenfrontanalyse auf der Basis des Wellenfrontfehlers

Bezogen auf das gesamte Patientenkollektiv fand sich nach konventioneller LASIK eine signifikante Verschlechterung des mittleren postoperativen Wellenfrontfehlers (HO-RMS) von $0,39 \pm 0,14 \mu\text{m}$ auf $0,58 \pm 0,30 \mu\text{m}$ ($p < 0,001$). Dies entspricht einem Increase Factor von $1,65 \pm 1,2$. Nach wellenfrontgeführter LASIK stieg der HO-RMS von $0,50 \pm 0,16$ auf $0,61 \pm 0,23 \mu\text{m}$ ($p = 0,004$) um den Increase Factor $1,32 \pm 0,6$ an. 17 % der mit der konventionellen LASIK behandelten Augen zeigten postoperativ einen unveränderten oder verbesserten HO-RMS. Nach wellenfrontgeführter LASIK waren es 40 %.

Da sich je nach zu korrigierender Myopie die notwendigen Gewebeabträge stark unterschieden und somit die Veränderung der kornealen Architektur unterschiedlich war, mußte zwischen niedrigen und höheren Korrekturen unterschieden werden. Im Korrekturbereich von $-1,0$ bis $-5,0$ dpt SÄ stieg der HO-RMS nach konventioneller LASIK von $0,35 \pm 0,12 \mu\text{m}$ auf $0,46 \pm 0,14 \mu\text{m}$ ($p < 0,001$) um den Increase Factor $1,36 \pm 0,36$. Dagegen verringerte er sich nach wellenfrontgeführter LASIK von $0,49 \pm 0,11 \mu\text{m}$ auf $0,47 \pm 0,11 \mu\text{m}$ ($p = 0,42$) (vgl. Abb. 13+14, S. 21 sowie Tab. 7+9, S.55) . Bei 16 % der mit der konventionellen LASIK behandelten Augen war postoperativ ein unveränderter oder verbesserter HO-RMS zu beobachten. Nach der wellenfrontgeführten LASIK war dies in 61 % der Fall.

Betrachtet man jedoch die stärker myopen Korrekturen von $-5,1$ bis $-10,5$ dpt SÄ, so stieg bei beiden Ablationsformen der HO-RMS-Wert statistisch signifikant an. Nach konventioneller LASIK kam es nahezu zu einer Verdopplung von $0,44 \pm 0,17 \mu\text{m}$ auf $0,78 \pm 0,40 \mu\text{m}$ ($p < 0,001$; Increase Factor $2,17 \pm 1,79$) und nach wellenfrontgeführter LASIK zu einem Anstieg von $0,50 \pm 0,19 \mu\text{m}$ auf $0,67 \pm 0,24 \mu\text{m}$ ($p < 0,001$; Increase Factor $1,46 \pm 0,62$) (vgl. Abb. 13+14, S. 21 sowie Tab. 8+10, S. 55). Im hochmyopen Korrekturbereich zeigten 19 % der mit der konventionellen LASIK behandelten Augen einen unveränderten oder verbesserten HO-RMS. Nach der wellenfrontgeführten LASIK war dies in 30 % der Fälle zu beobachten.

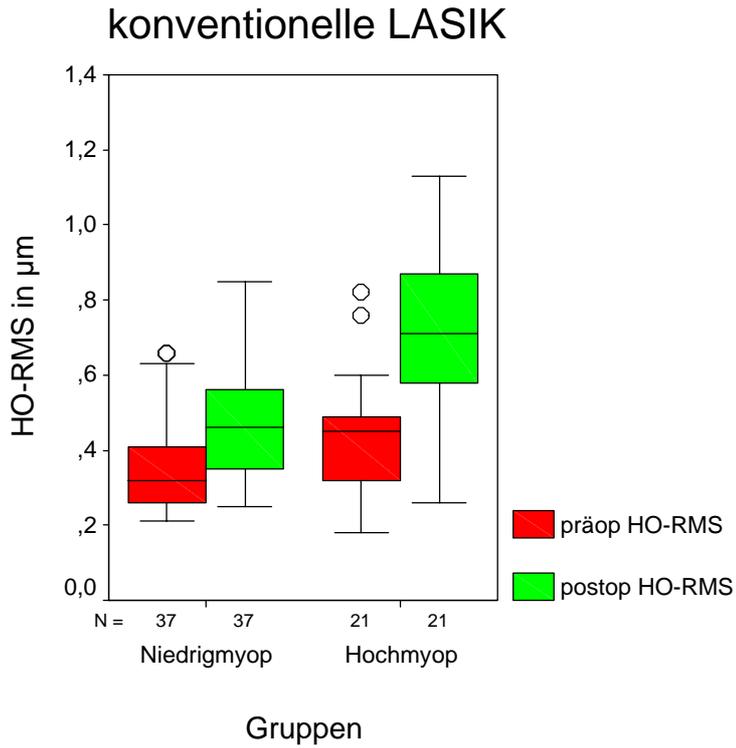


Abb. 13: Wellenfrontfehler prä- und postoperativ, konventionelle LASIK (Kreis = Ausreißer)

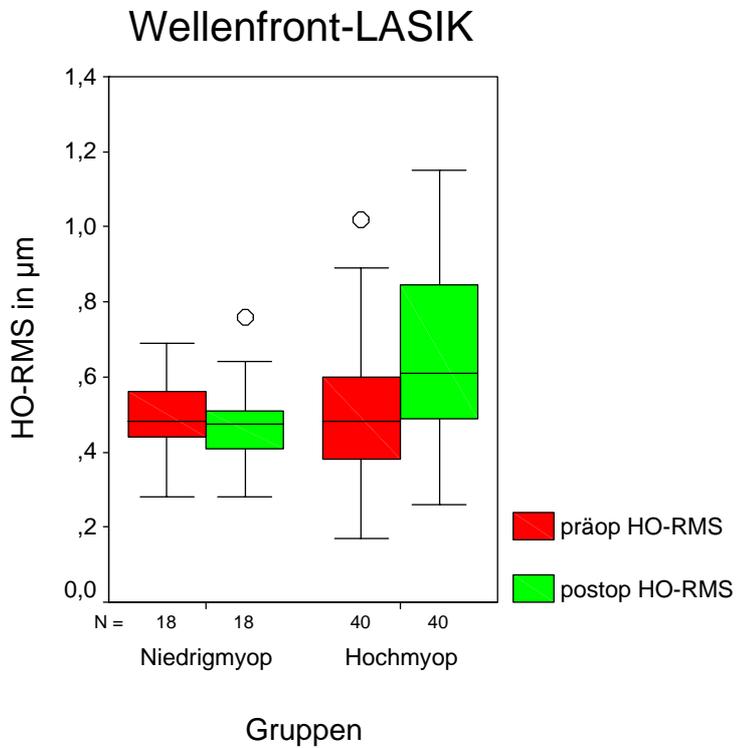


Abb. 14: Wellenfrontfehler prä- und postoperativ, wellenfrontgeführte LASIK (Kreis = Ausreißer)

4.1.2 Wellenfrontanalyse durch Auswertung der Einzelaberrationen

Nach Auswertung der Einzelaberrationen zeigte sich, dass bei Betrachtung der Gesamtkollektive von konventioneller und wellenfrontgeführter LASIK es nach beiden LASIK-Methoden zu Verschlechterungen in der 4. und 5. Ordnung kam. Nach konventioneller LASIK nahmen alle Aberrationen 4. Ordnung signifikant zu. In der 5. Ordnung verschlechterten sich alle Brechungsfehler bis auf den sekundären Trefoil und das sekundäre Koma entlang der x-Achse. Nach wellenfrontgeführter Ablation stiegen mit Ausnahme des sekundären Astigmatismus und des sekundären Trefoil entlang der y-Achse alle Brechungsfehler der 4. und 5. Ordnung signifikant an. Unterschiede fanden sich im Bereich der 3. Ordnung. Die Aberrationen 3. Ordnung blieben nach wellenfrontgeführter LASIK unverändert und zeigten darüber hinaus eine Tendenz zur Verbesserung (horizontaler Trefoil). Hingegen war nach konventioneller LASIK eine statistisch gesicherte Zunahme der Aberrationen 3. Ordnung (vertikales Koma) zu verzeichnen.

Nach Differenzierung hinsichtlich der beiden Korrekturbereiche fiel auf, dass nach wellenfrontgeführter LASIK im Korrekturbereich -1,0 bis -5,0 dpt SÄ die Einzelaberrationen der 4. und 5. Ordnung (Ausnahme horizontaler Quadrafoil und vertikaler Pentafoil) betragsmäßig präoperativ und postoperativ nahezu unverändert blieben, während es bei der konventionellen LASIK zu signifikanten Verschlechterungen kam (alle Aberrationen der 4. und 5. Ordnung mit Ausnahme Pentafoil, sekundärer Trefoil und sekundäres Koma entlang der x-Achse). Ein besonderer Fokus der Auswertung galt den sphärischen Aberrationen, die nach wellenfrontgeführter LASIK indifferent blieben ($0,19 \pm 0,17 \mu\text{m}$ auf $0,22 \pm 0,12 \mu\text{m}$; $p=0,169$), während sie nach konventioneller LASIK signifikant anstiegen ($0,17 \pm 0,13 \mu\text{m}$ auf $0,23 \pm 0,14 \mu\text{m}$; $p=0,001$) (vgl. Abb. 15+16, S. 23 sowie Tab. 11+13, S.56-57).

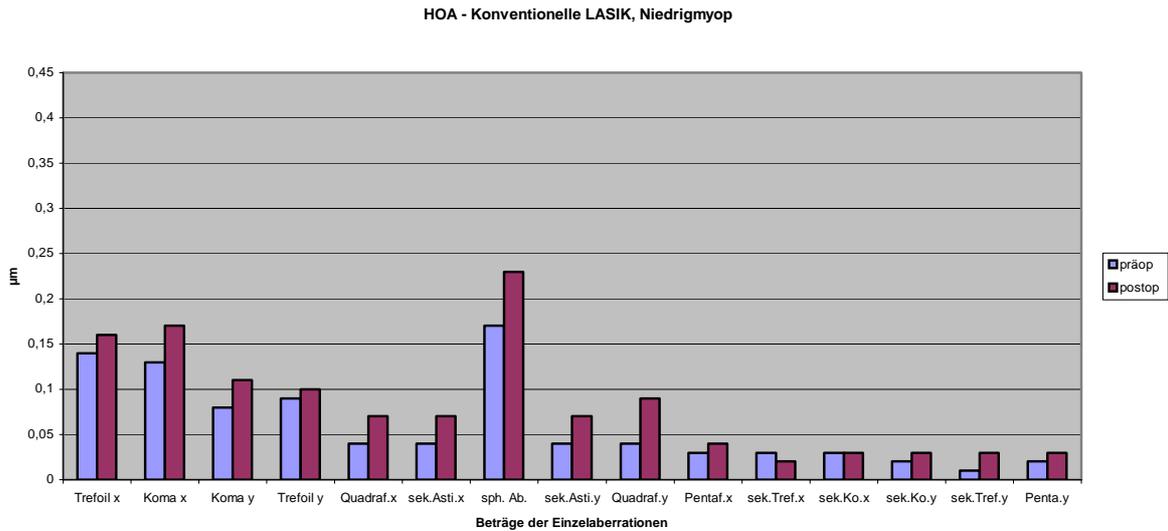


Abb. 15: Einzelaberrationen prä- und postoperativ konventionelle LASIK, Gruppe Niedrigmyop

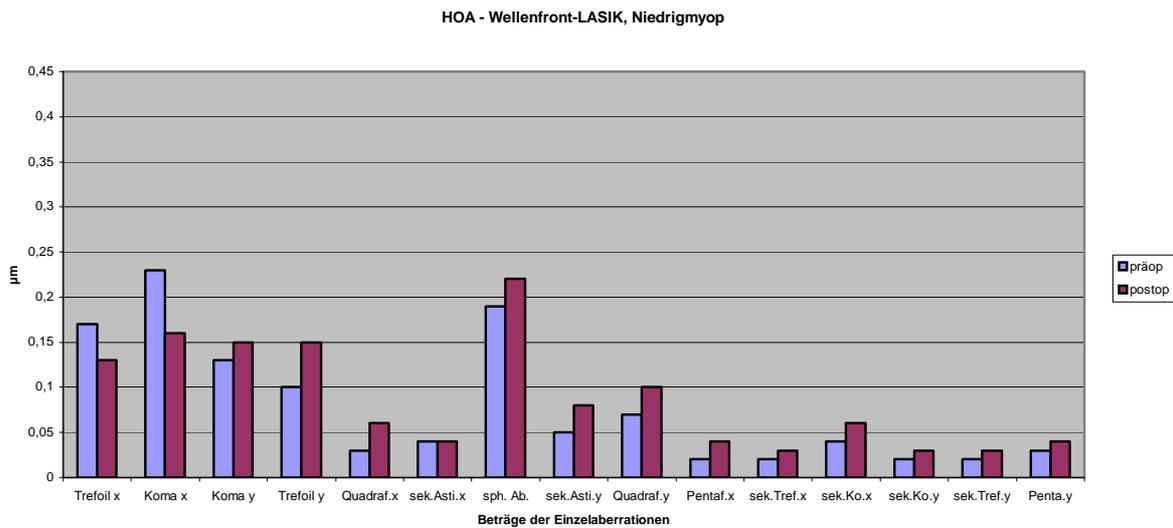


Abb. 16: Einzelaberrationen prä- und postoperativ Wellenfront-LASIK, Gruppe Niedrigmyop

Im hochmyopen Korrekturbereich hingegen nahmen bei beiden Ablationsprofilen die sphärischen Aberrationen postoperativ signifikant zu, allerdings in unterschiedlichem Ausmaß. Nach konventioneller LASIK kam es zu einer Zunahme auf das fast Zweifache ($0,19 \pm 0,12 \mu\text{m}$ auf $0,36 \pm 0,19 \mu\text{m}$; $p=0,001$). Nach wellenfrontgeführter Ablation war nur ein Anstieg um ein Drittel zu beobachten (von $0,26 \pm 0,18 \mu\text{m}$ auf $0,42 \pm 0,19 \mu\text{m}$; $p=0,001$). Beim weiteren Vergleich der beiden Ablationsprofile im höheren Korrekturbereich fanden sich

nach Einsatz beider Methoden Verschlechterungen auch bezüglich der restlichen Aberrationen der 4. sowie der 5. Ordnung. Nach konventioneller LASIK waren horizontale Quadrafoil, horizontaler und vertikaler Pentafoil wie auch das sekundäre Koma entlang der y-Achse signifikant erhöht. Bei der wellenfrontgeführten Ablation waren der horizontale und vertikale Quadrafoil, der sekundäre Astigmatismus entlang der x-Achse, der horizontale und vertikale Pentafoil sowie der sekundäre Trefoil und das sekundäre Koma entlang der x-Achse deutlich erhöht (vgl. Abb. 17+18, sowie Tab. 12+14, S. 56-57).

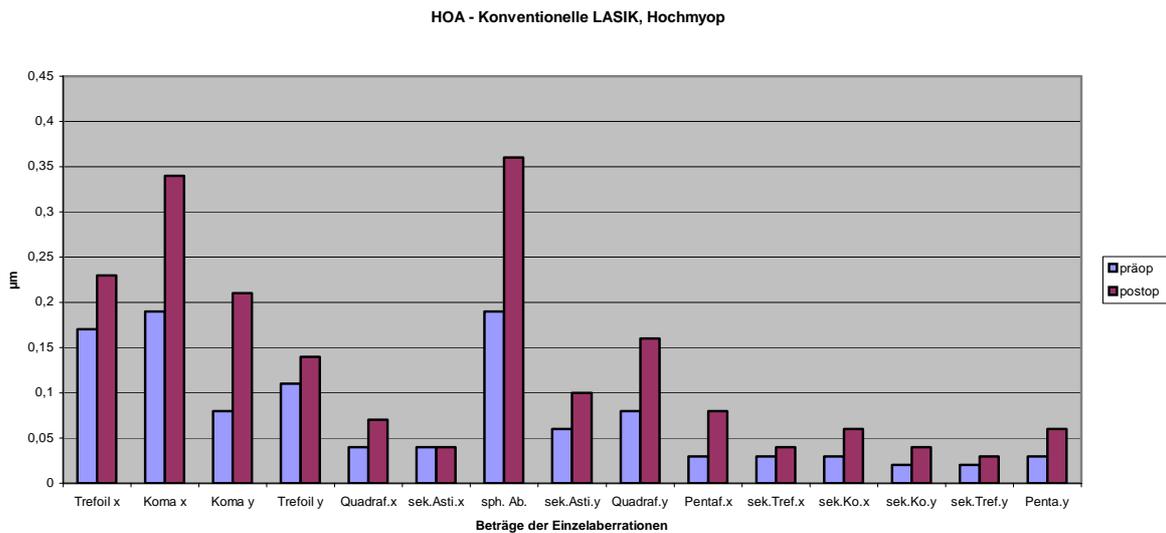


Abb. 17: Einzelaberrationen prä- und postoperativ konventionelle LASIK, Gruppe Hochmyop

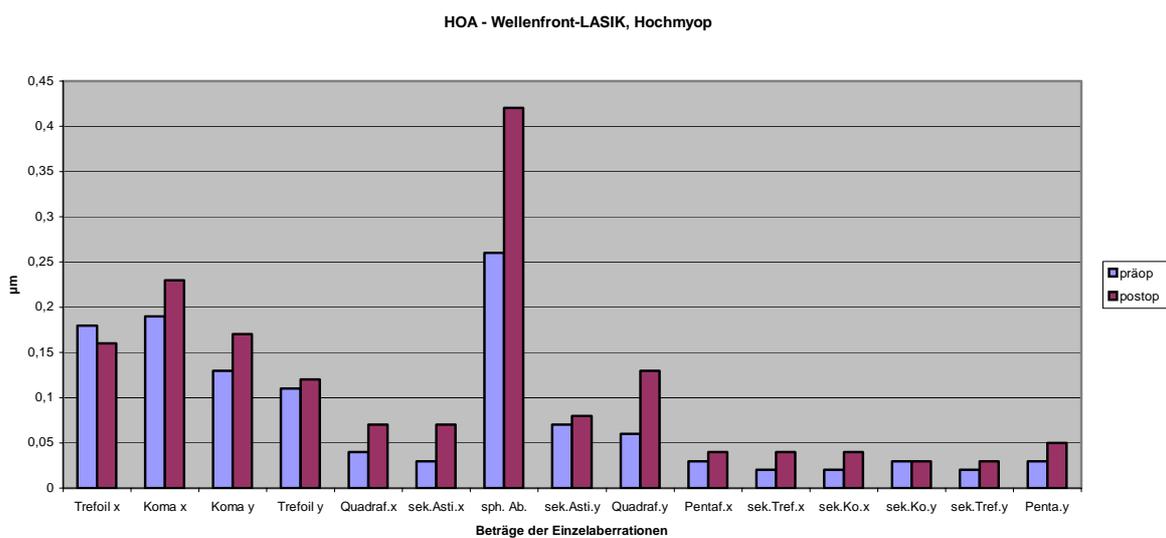


Abb. 18: Einzelaberrationen prä- und postoperativ Wellenfront-LASIK, Gruppe Hochmyop

Unterschiede gab es in der 3. Ordnung. Alle Aberrationen dieser Ordnung waren nach wellenfrontgeführter LASIK sowohl im niedrigmyopen als auch im hochmyopen Korrekturbereich statistisch gesichert unverändert. Darüber hinaus zeigte sich bei den Niedrigmyopen eine Tendenz zur Verbesserung des Trefoil und Koma entlang der x-Achse, bei den Hochmyopen ebenfalls vom horizontalen Trefoil. Dem gegenüber führte die konventionelle LASIK in beiden Korrekturbereichen zu Verschlechterungen aller Aberrationen der 3. Ordnung (statistisch signifikant das vertikale Koma) (vgl. Abb. 15-18, S. 23+24 sowie Tab. 11-14, S. 56-57).

4.2 Ergebnisse der subjektiven postoperativen Refraktion

Die subjektive postoperative Refraktion betrug in der Gruppe der konventionellen LASIK im Mittel $-0,06 \pm 0,24$ dpt SÄ und nach wellenfrontgeführter Ablation $-0,02 \pm 0,37$ dpt SÄ. Die Ergebnisse der Untergruppen waren vergleichbar (vgl. Abb. 19+20, S. 25+26).

Nach konventioneller LASIK lagen 93,1% und nach wellenfrontgeführter LASIK 89,7% der operierten Augen innerhalb von $\pm 0,5$ dpt SÄ um die Emmetropie.

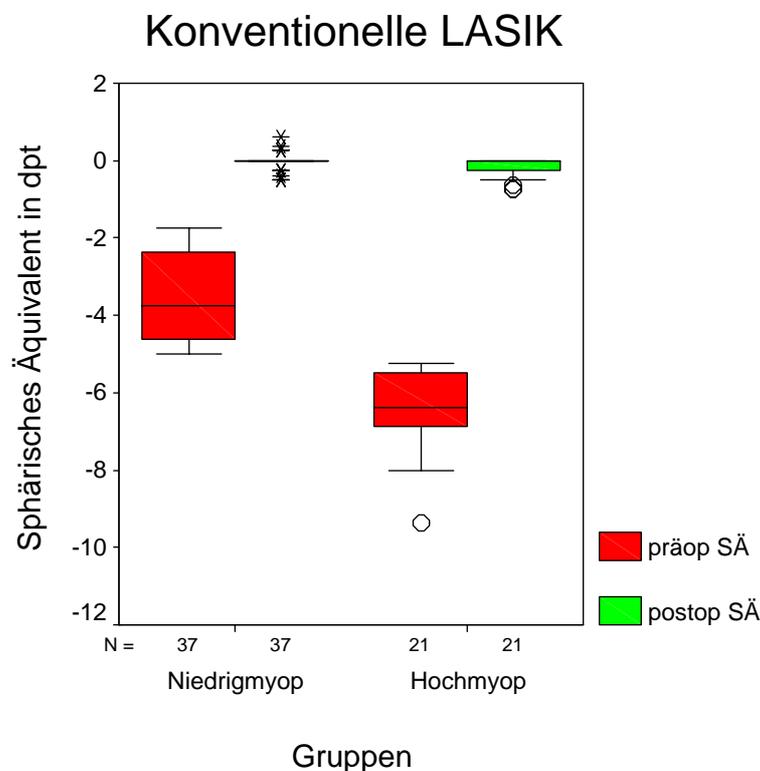


Abb. 19: Sphärisches Äquivalent prä- und postoperativ, konventionelle LASIK (Kreis = Ausreißer, Stern = Extremwert)

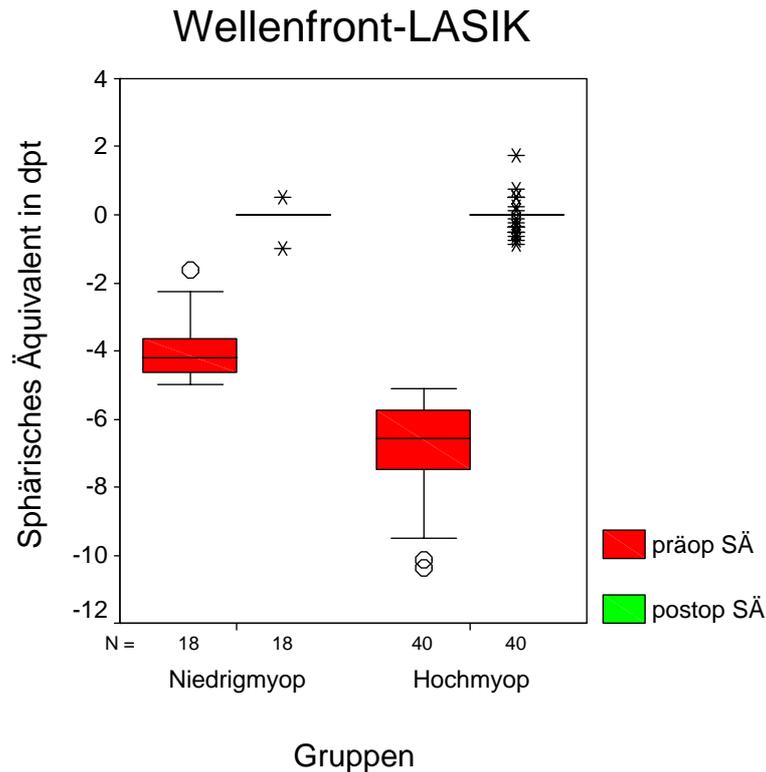


Abb. 20: Sphärisches Äquivalent prä- und postoperativ, Wellenfront-LASIK
(Kreis = Ausreißer, Stern = Extremwert)

Der unkorrigierte Visus betrug postoperativ im Durchschnitt 0,97 (0,01 ± 0,11 LogMAR) nach konventioneller LASIK und 0,91 (0,04 ± 0,09 LogMAR) nach wellenfrongeführter LASIK (vgl. Abb. 21+22, S. 27). (Die statistische Berechnung der Sehschärfe erfolgte anhand der LogMAR-Werte. LogMAR ist der dekadische Logarithmus des minimalen Auflösungswinkels. Zum besseren Verständnis wurden die LogMAR-Werte in dezimale Zahlen zurückgerechnet. Dies wurde auch von Tietjen et al. [2008] so gehandhabt.) Der bestkorrigierte Visus war in der Gruppe der konventionellen LASIK im Mittel bei 1,05 (-0,02 ± 0,08 LogMAR) und in der Wellenfront-LASIK-Gruppe 0,98 (0,01 ± 0,07 LogMAR). Sechs Monate postoperativ erreichten 67,2% der operierten Augen nach konventioneller LASIK und 69,0% nach wellenfrontgeführter LASIK eine unkorrigierte Sehschärfe entsprechend der präoperativen bestkorrigierten Sehschärfe oder besser. Bei 87,9% der Patientenaugen nach konventioneller LASIK und 91,4% nach wellenfrontgeführter LASIK entsprach der postoperative bestkorrigierte Visus dem präoperativ bestkorrigiertem Visus oder besser. Die maximale unkorrigierte Sehschärfe nach

konventioneller LASIK lag bei 1,6 (-0,2 LogMAR), die der wellenfrontgeführten LASIK bei 1,2 (-0,08 LogMAR).

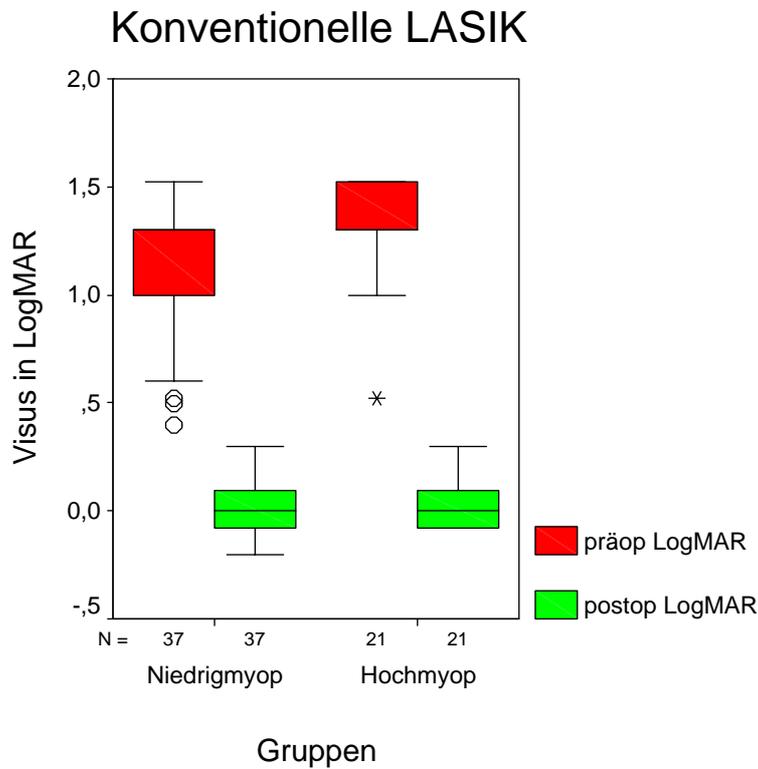


Abb. 21: LogMAR-Visus prä- und postoperativ, Konventionelle LASIK (Kreis = Ausreißer, Stern = Extremwert)

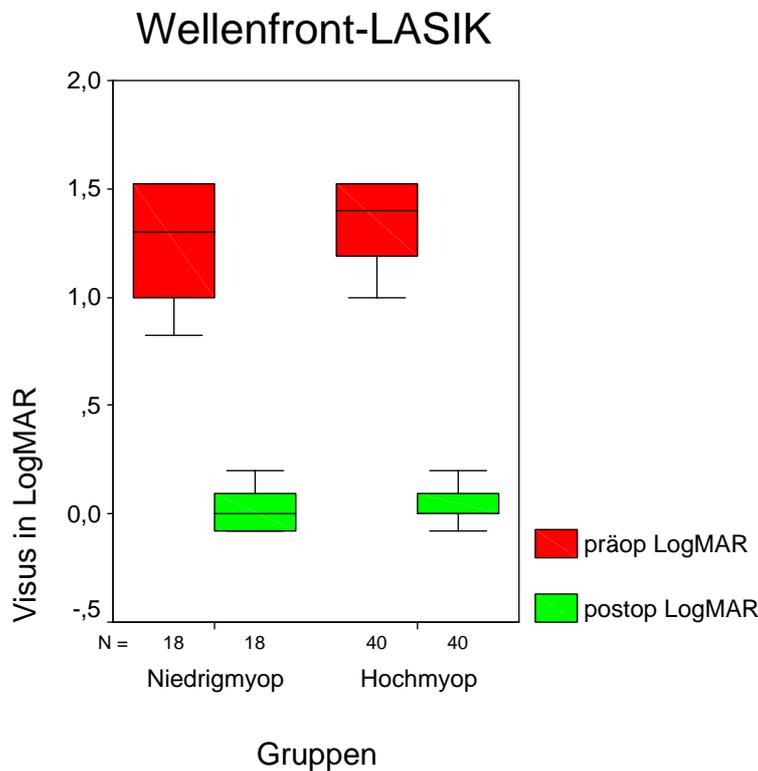


Abb. 22: LogMAR-Visus prä- und postoperativ, Wellenfront-LASIK

4.3 Ergebnisse: Dämmerungssehen, Blendungsempfindlichkeit

Im Korrekturbereich -1,0 bis -5,0 dpt SÄ war das Dämmerungssehen ohne Blendung sowohl nach konventioneller als auch wellenfrontgeführter LASIK statistisch indifferent im Vergleich zu den präoperativen Werten, wobei ein eindeutiger Trend zur Verschlechterung zu beobachten war (vgl. Abb. 23+24, sowie Tab. 15+17, S. 58).

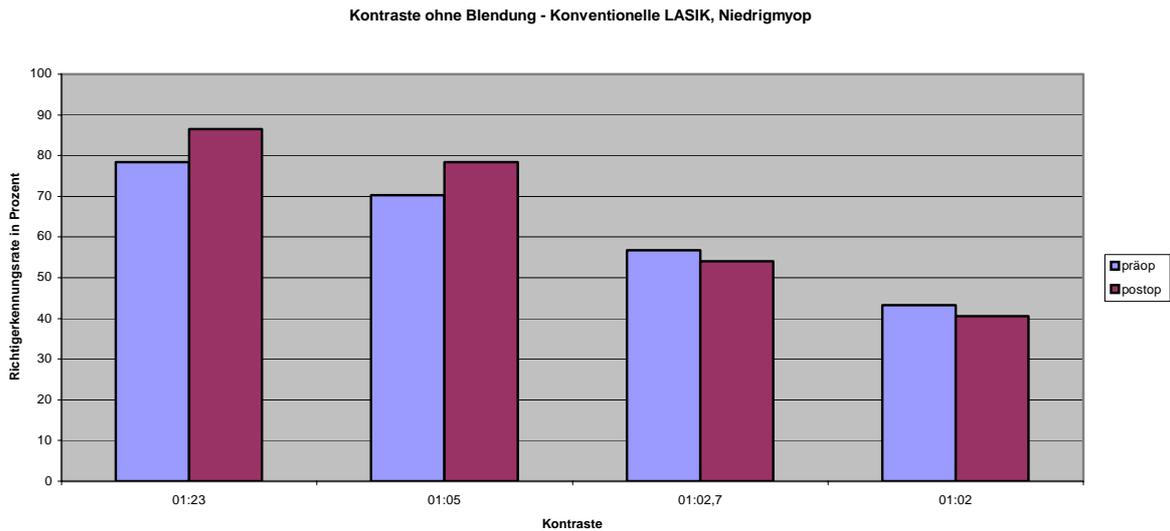


Abb. 23: Dämmerungssehen ohne Blendung prä- und postoperativ konventionelle LASIK, Niedrigmyop

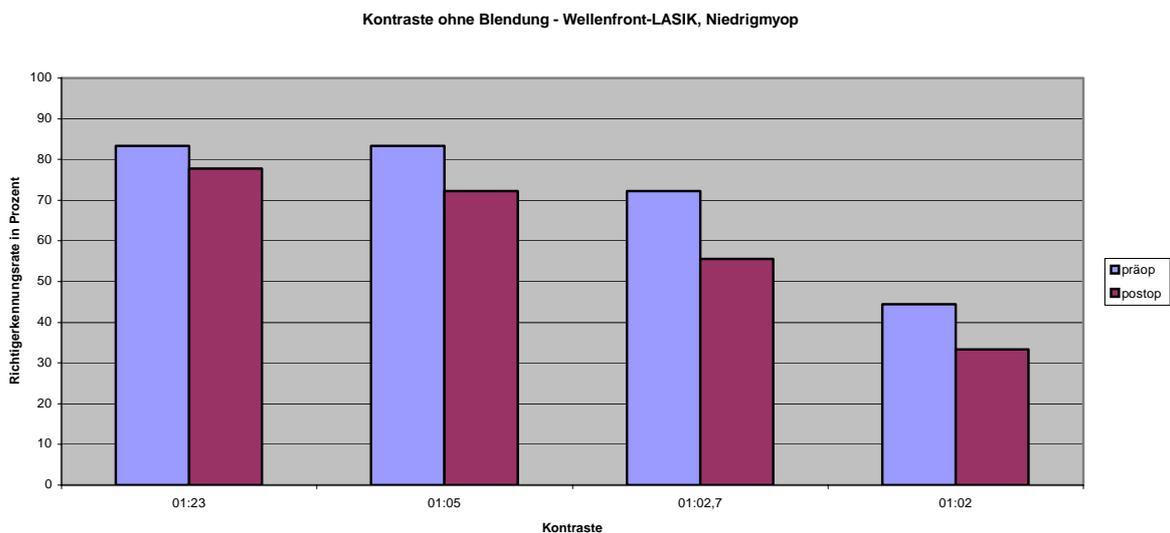


Abb. 24: Dämmerungssehen ohne Blendung prä- und postoperativ Wellenfront-LASIK, Niedrigmyop

Im Korrekturbereich -5,1 bis -10,5 dpt SÄ führten beide Ablationsprofile zu einer Verschlechterung des Dämmerungssehens auf allen Kontraststufen (vgl. Abb. 25+26). Statistisch signifikant ließ sich eine Verschlechterung nach wellenfrontgeführter LASIK im Kontrastbereich 1:5 ($p=0,039$); 1:2,7 ($p=0,022$) und 1:2 ($p=0,012$) feststellen (vgl. Tab. 16+18, S. 58-59).

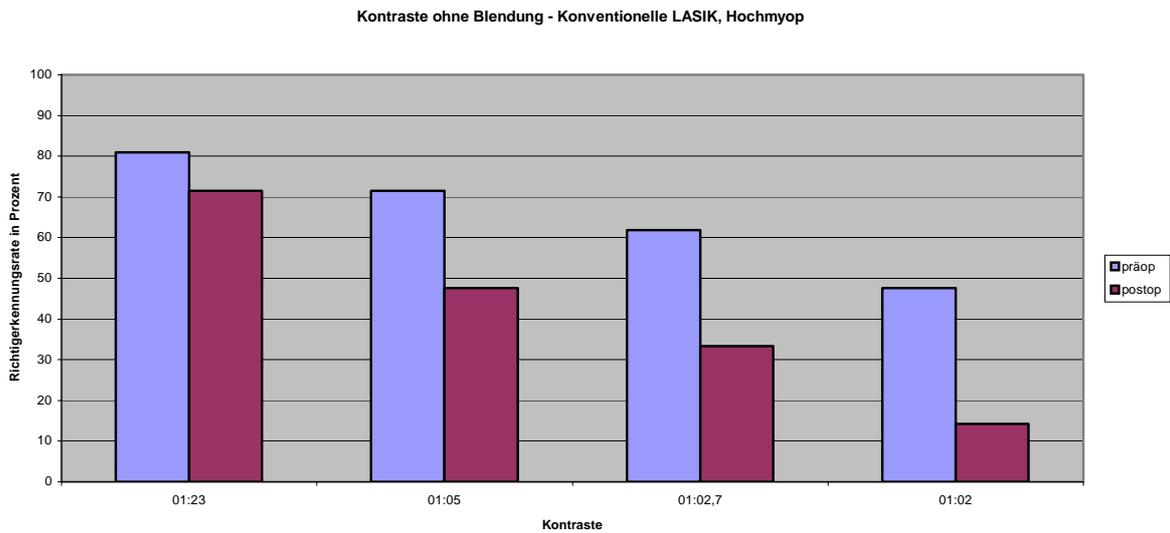


Abb. 25: Dämmerungssehen ohne Blendung prä- und postoperativ konventionelle LASIK, Hochmyop

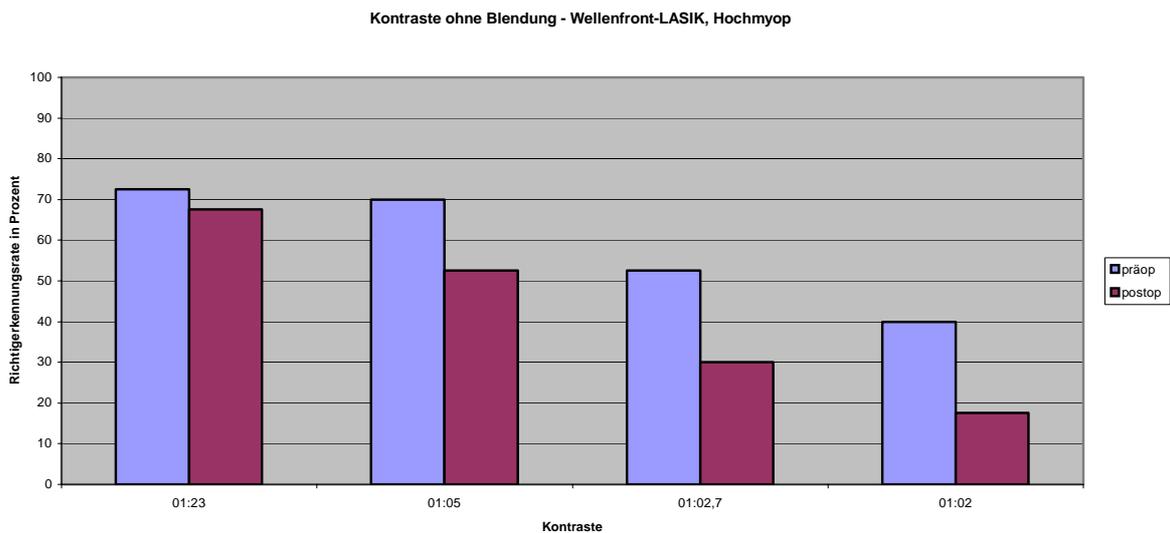


Abb. 26: Dämmerungssehen ohne Blendung prä- und postoperativ Wellenfront-LASIK, Hochmyop

Im Korrekturbereich -1,0 bis -5,0 dpt SÄ war das Dämmerungssehen mit Blendung (Blendungsempfindlichkeit) sowohl nach konventioneller als auch wellenfrontgeführter LASIK auf allen Kontraststufen statistisch nicht signifikant verändert im Vergleich zu den präoperativen Werten, wobei fast alle Kontraststufen eine Tendenz zur Verschlechterung zeigten (vgl. Abb. 27+28, sowie Tab. 15+17, S. 58).

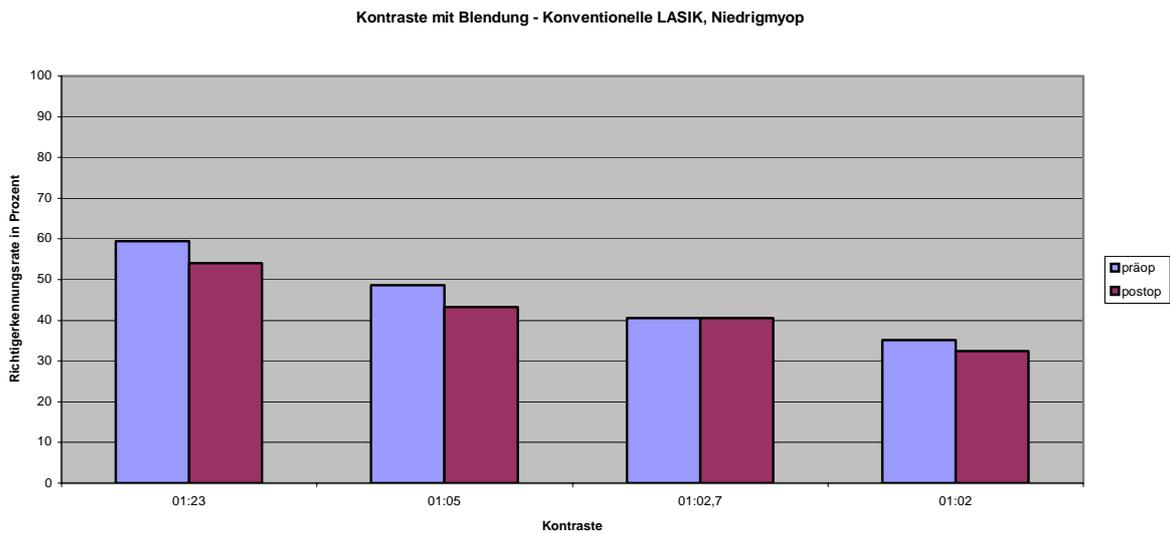


Abb. 27: Dämmerungssehen mit Blendung prä- und postoperativ konventionelle LASIK, Niedrigmyop

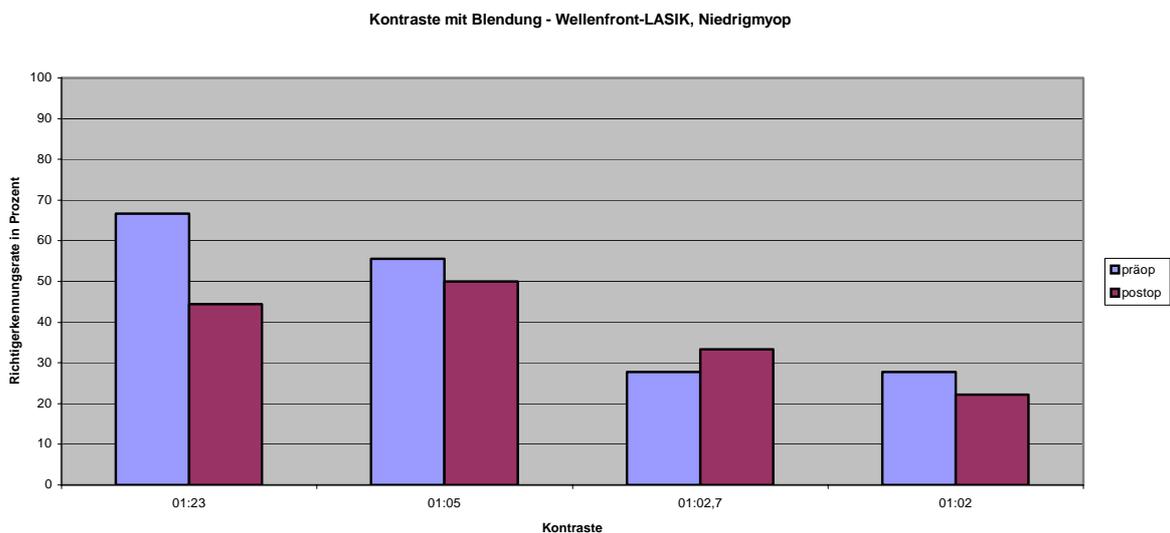


Abb. 28: Dämmerungssehen mit Blendung prä- und postoperativ Wellenfront-LASIK, Niedrigmyop

Beide LASIK-Methoden führten postoperativ nach Korrektur höherer Myopien zu einer Verstärkung der Blendungsempfindlichkeit. Signifikante Verschlechterungen zeigten sich nach konventioneller LASIK im Kontrastbereich 1:5 ($p=0,039$) und 1:2,7 ($p=0,012$) und nach wellenfrongeführter LASIK im Kontrastbereich 1:23 ($p=0,022$), 1:5 ($p=0,003$), 1:2,7 ($p=0,013$) und 1:2 ($p=0,012$) (vgl. Abb. 29+30, sowie Tab. 16+18, S. 58-59).

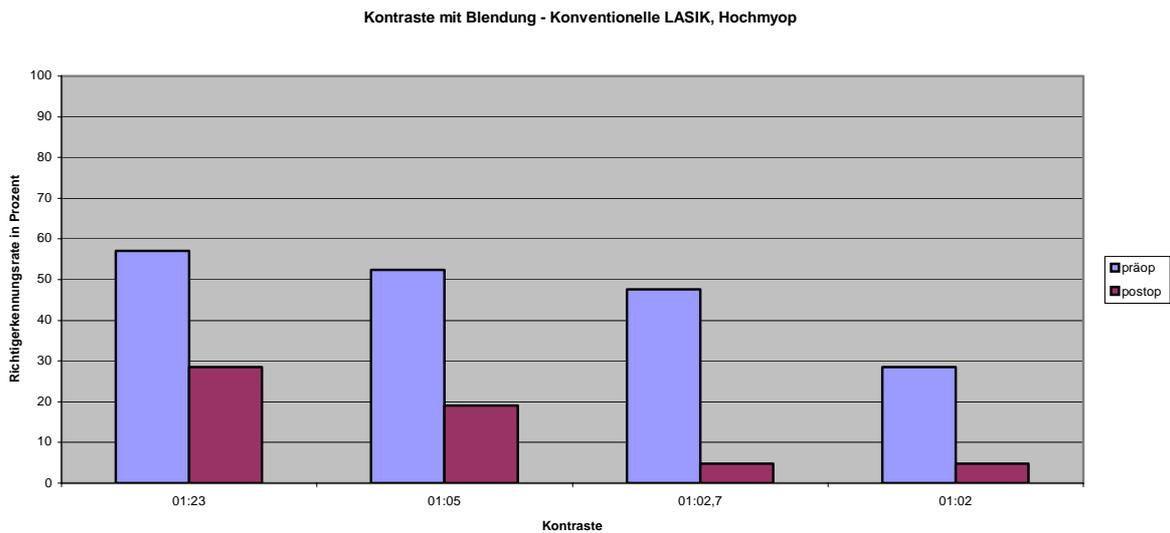


Abb. 29: Dämmerungssehen mit Blendung prä- und postoperativ konventionelle LASIK, Hochmyop

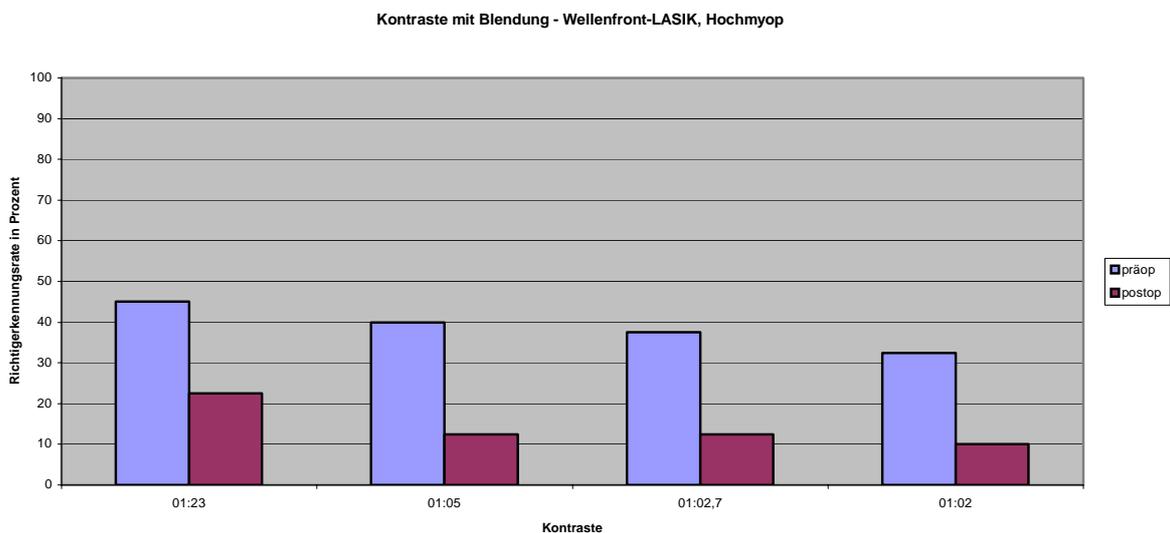


Abb. 30: Dämmerungssehen mit Blendung prä- und postoperativ Wellenfront-LASIK, Hochmyop

4.4 Ergebnisse: Kontrastsensitivität

Die statistische Auswertung erfolgte für jede Ortsfrequenz und jede Beleuchtungsstärke getrennt in Anlehnung an Publikationen von Montés-Micó et al. [2003], Quesnel et al. [2004] und Kaisermann et al. [2004]. Yamane et al. [2004] hingegen nutzten die „area under the log contrast sensitivity function“ zur Auswertung des Kontrastssehens mit Hilfe des FACT, um das Risiko statistischer Fehler zu minimieren. Dies hatte jedoch den Nachteil, dass alle Ortsfrequenzen von einem Wert repräsentiert wurden und Veränderungen einzelner nicht zum Ausdruck kamen.

Die hier vorgestellten Untersuchungen zeigten im Korrekturbereich -1,0 bis -5,0 dpt SÄ, dass die Patienten nach wellenfrontgeführter LASIK im photopischen Bereich auf allen Ortsfrequenzen einen höheren FACT-Score, also eine bessere Kontrastempfindlichkeit, im Vergleich zu den präoperativen Werten aufwiesen. Ein statistisch signifikanter Unterschied war jedoch nur bei der größten Ortsfrequenz (1,5 cpd: $p=0,011$) nachweisbar. Auch mesopisch war ein Trend zu Verbesserungen im Bereich der großen Ortsfrequenzen (1,5 cpd; 3 cpd) zu beobachten (vgl. Abb. 31 sowie Tab. 21, S. 60). Nach konventioneller LASIK war auf fast allen Ortsfrequenzen sowohl photopisch als auch mesopisch eine Verschlechterung festzustellen. Signifikant ließ sich dies im Bereich der kleineren Ortsfrequenzen photopisch bei 18 cpd ($p=0,018$) und mesopisch bei 6cpd ($p=0,027$) und 18 cpd ($p=0,007$) belegen (vgl. Abb. 32, S. 33 sowie Tab.19, S. 59).

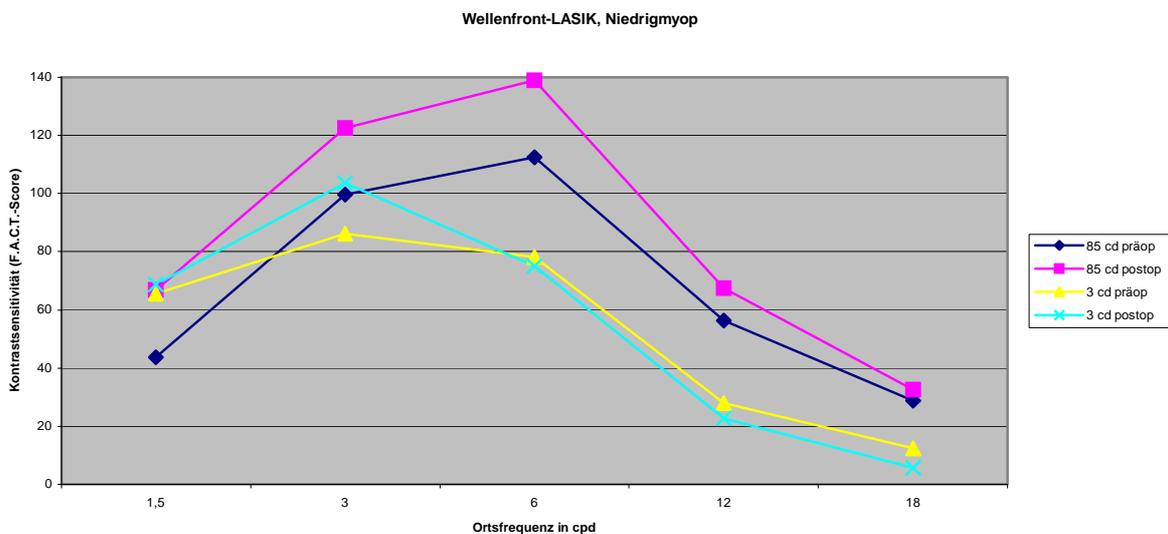


Abb. 31: Kontrastsensitivität prä- und postoperativ, Wellenfront-LASIK, Gruppe Niedrigmyop

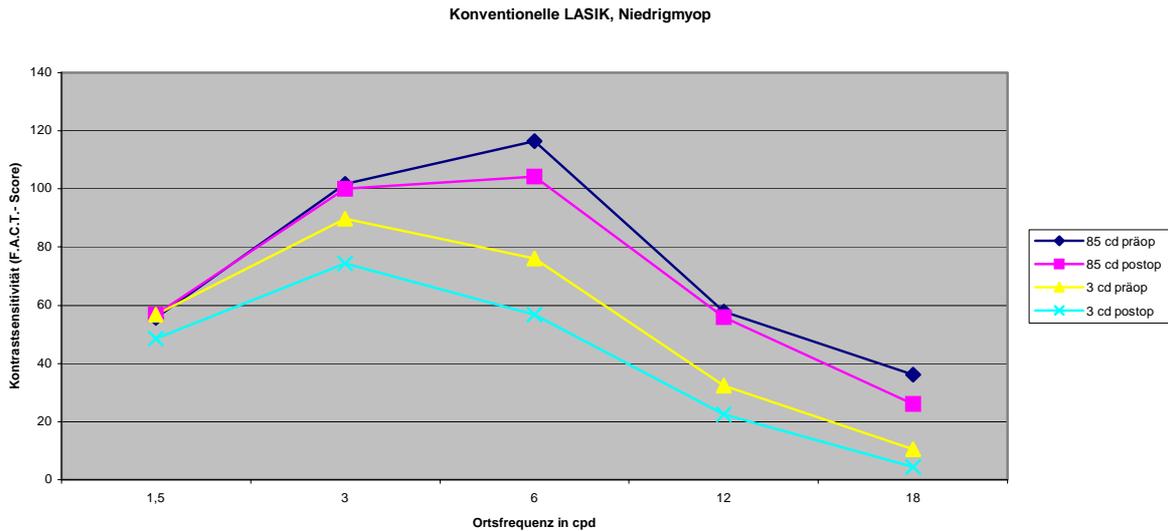


Abb. 32: Kontrastsensitivität prä- und postoperativ, konventionelle LASIK, Gruppe Niedrigmyop

Im hochmyopen Behandlungsbereich blieb die Kontrastsensitivität nach wellenfrontgeführter LASIK statistisch unverändert mit vereinzelt Tendenzen zu Verbesserung sowohl im photopischen (1,5 cpd) als auch mesopischen (6 cpd) Bereich (vgl. Abb. 33 sowie Tab. 22, S. 60). Die Ergebnisse nach konventioneller LASIK waren hingegen sehr unterschiedlich. Geringen Verbesserungen photopisch auf den großen Ortsfrequenzen (1,5 cpd: $p=0,039$; 3 cpd: $p=0,041$) standen signifikanten Verschlechterungen mesopisch im Bereich der kleinen Ortsfrequenzen (12 cpd: 0,042; 18 cpd: 0,046) gegenüber (vgl. Abb. 34, S. 34 sowie Tab 20, S. 59).

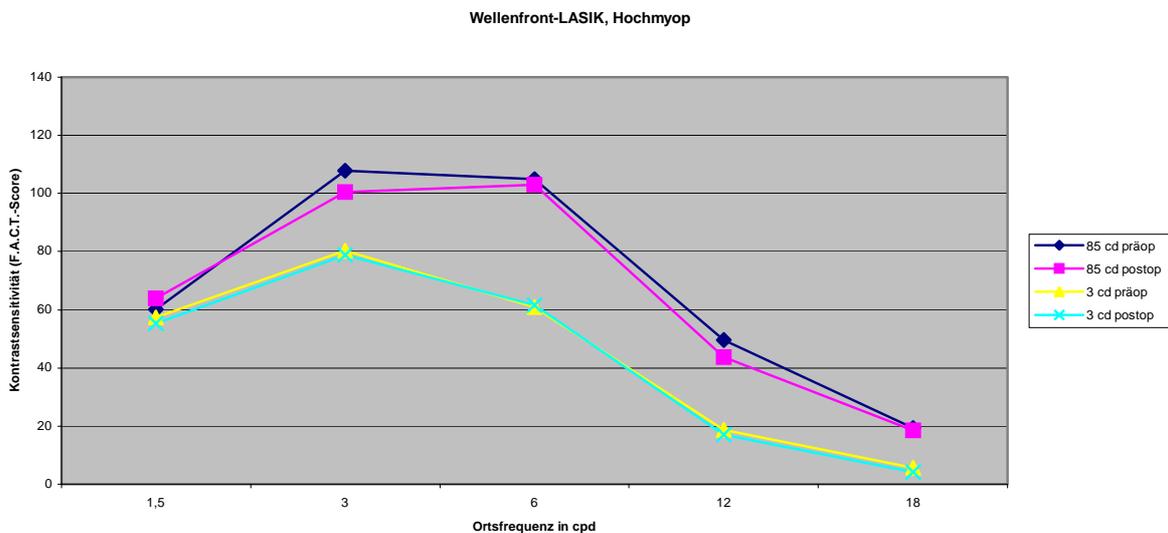


Abb. 33: Kontrastsensitivität prä- und postoperativ, Wellenfront-LASIK, Gruppe Hochmyop

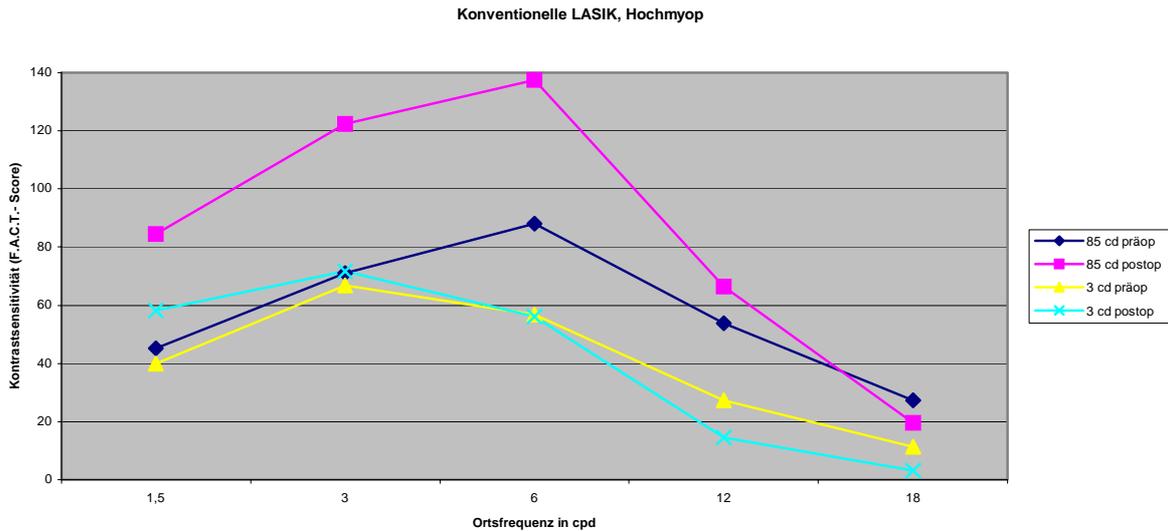


Abb. 34: Kontrastsensitivität prä- und postoperativ, konventionelle LASIK, Gruppe Hochmyop

4.5 Auswertung des Fragebogens

Das Dämmerungssehen blieb nach konventioneller LASIK in 93% der behandelten Augen unverändert oder verbesserte sich, nach wellenfrongeführter LASIK in 81%. In 63% der Fälle fand sich nach konventioneller LASIK keine Veränderung oder eine Verbesserung der Blendungsempfindlichkeit. Nach wellenfrontgeführter LASIK waren es 69%. Bezüglich des Kontrastsehens führte die konventionelle LASIK in 89% zu keiner Veränderung oder zu einer Verbesserung, die wellenfrontgeführte LASIK in 81% der Fälle.

5. Diskussion

Das Ziel der LASIK-Operation ist primär die Korrektur der Myopie und des Astigmatismus, das heißt eine signifikante Reduzierung der Brechungsfehler 2. Ordnung, um dem Patienten die Freiheit von Korrektionshilfen in Form von Brille oder Kontaktlinse zu gewähren. Dies konnte durch den Einsatz beider Verfahren erreicht werden. Die postoperative Refraktion betrug nach konventioneller LASIK im Durchschnitt $-0,06 \pm 0,03$ dpt SÄ und nach wellenfrontgeführter Ablation $-0,02 \pm 0,05$ dpt SÄ.

Die Brechungsfehler der 3. bis 5. Ordnung werden durch den Wellenfrontfehler (HO-RMS-Wert) repräsentiert. Dieser zeigte sowohl nach konventioneller als auch nach wellenfrontgeführter LASIK einen signifikanten Anstieg. Allerdings stieg er nach wellenfrontgeführter LASIK im Durchschnitt nur um den Faktor $1,32 \pm 0,6$ an, während es nach konventioneller LASIK zu einer Verschlechterung um $1,6 \pm 1,2$ kam. Bei 40% der mit dem Wellenfrontprofil gelaserten Augen blieb der HO-RMS-Wert postoperativ unverändert oder verbesserte sich. Nach konventioneller LASIK war dies nur bei 17% der Fall.

Ähnliche Ergebnisse publizierten Kohnen et al. [2004 a]. Sie beobachteten einen Zuwachs des Wellenfrontfehlers um $1,52 \pm 0,36$ nach Wellenfront-LASIK, der ebenfalls deutlich geringer im Vergleich mit der konventionellen LASIK ausfiel. 20,6% der Augen hatten laut Kohnen postoperativ einen unveränderten oder verbesserten HO-RMS. Die Ursache der letztlich besseren Ergebnisse der hier vorgestellten Untersuchungen im Vergleich zu der Kohnen-Studie resultiert möglicherweise aus dem Zeitunterschied von 3 Jahren zwischen beiden Untersuchungen (Kohnen: prospektive Studie von März bis Juni 2001) und den damit verbundenen technischen Neuerungen (verbesserte Laser, Algorithmen, Eyetracker) wie auch die Zunahme der chirurgischen Erfahrung. Den Trend zu einem geringeren Anstieg des HO-RMS-Wertes nach wellenfrontgeführter LASIK bestätigten auch Mrochen et al. [2001 a] in ihrer Publikation über wellenfrontgeführte LASIK.

Je höher die zu korrigierende Myopie ist, desto größer ist auch die Veränderung der Biomechanik der Hornhaut. So ist es erforderlich, innerhalb der beiden LASIK-Methoden zwischen niedrigen und höheren Korrekturen zu unterscheiden.

Im niedrigmyopen Korrekturbereich gelang es, mittels wellenfrontgeführter LASIK den postoperativen HO-RMS-Wert zu reduzieren. Bei der konventionellen LASIK dagegen nahm er signifikant zu. Im hochmyopen Korrekturbereich war weder nach konventioneller noch nach wellenfrontgeführter LASIK eine Reduktion der höheren Aberrationen zu beobachten. Es zeigte sich aber auch hier der Trend zu einem geringeren Anstieg des postoperativen HO-RMS-Wertes nach wellenfrontgeführter Ablation als nach konventioneller LASIK, auch wenn diese Ergebnisse nicht statistisch signifikant waren.

Die Ursache für die beobachteten Unterschiede zwischen beiden LASIK-Methoden liegt mit großer Wahrscheinlichkeit im Ablationsprofil der wellenfrontgeführten LASIK. So werden auch die Brechungsfehler höherer Ordnung in das Abtragungsprofil mit eingerechnet, während bei der konventionellen LASIK nur die Aberrationen 2. Ordnung das Abtragungsprofil bestimmen. Die wellenfrontgeführte LASIK ist damit zusätzlich in der Lage präoperativ bestehende Aberrationen höherer Ordnung zu reduzieren und den optische Seheindruck damit positiv zu beeinflussen. Im hochmyopen Korrekturbereich überwiegt die Induktion, so dass der HO-RMS-Wert auch nach wellenfrontgeführter LASIK signifikant ansteigt. Der Anstieg ist aber im Vergleich zur konventionellen LASIK weniger deutlich, was auch die hier zugrunde liegenden Untersuchungen belegen.

Eine Bewertung, die sich nur am HO-RMS-Wert orientiert, beinhaltet den großen Nachteil, dass bei der Errechnung dieses Wellenfrontfehlers alle Einzelaberrationen gleichwertig, unabhängig vom Ausmaß des tatsächlichen Einflusses auf den optischen Seheindruck, berücksichtigt werden. Deshalb ist eine nähere Betrachtung einiger Einzelaberrationen anzustreben.

Besondere Beachtung gilt den sphärischen Aberrationen (4.Ordnung), die eine ausgeprägte Wirkung auf die optische Qualität haben, verdeutlicht durch die zentrale Lage in der Zernike-Pyramide der optischen Aberrationen. Die Hornhaut weist mit starken interindividuellen Schwankungen weitgehend stabile positive sphärische Aberrationen auf. Die jugendliche Linse dagegen verfügt über negative Brechungsfehler, wodurch die positiven Brechungsfehler der Hornhaut weitgehend ausgeglichen werden [Kohnen und Klaproth 2008]. Mit zunehmendem Lebensalter (ab dem 40.-45. Lebensjahr) werden die

Brechungsfehler der Linse positiv, bedingt durch den Alterungsprozeß der Linse. Daraus resultiert ein Übergewicht positiver sphärischer Gesamtaberrationen des Auges. Sphärische Aberrationen unterliegen nicht nur altersbedingten Veränderungen, sondern können auch durch operative Eingriffe z.B. eine LASIK-Operation induziert werden, die letztlich in das natürliche Gleichgewicht der Aberrationen von Hornhaut und Linse eingreifen. Bei den Aberrationen, die durch eine LASIK-Operation induziert werden, handelt es sich hauptsächlich um sphärische Aberrationen [Holladay et al. 1999, Morreno-Barriuso et al. 2001, Kohnen und Bühren 2004 b, Kim et al. 2004, Kaisermann et al. 2004, Yamane et al. 2004, Quesnel et al. 2004, Yoon et al. 2005, Mrochen et al. 2006]. Die sphärischen Aberrationen rekrutieren zahlenmäßig den größten Anteil der höheren Aberrationen.

Sowohl nach wellenfrontgeführter als auch nach konventioneller LASIK stiegen die sphärischen Aberrationen in der hier vorliegenden Untersuchung signifikant bis zum zweifachen Wert an. Diese Tatsache belegen auch die Studien von Kohnen et al. [2004 a], Mrochen et al. [2001 a] und Morreno-Barriuso et al. [2001]. Sie fanden keinen Unterschied zwischen beiden Ablationsprofilen.

Erst die Untersuchung hinsichtlich der beiden Korrekturbereiche zeigte in der eigenen Untersuchung den Vorteil des Wellenfrontprofils. Im niedrigmyopen Korrekturbereich war die wellenfrontgeführte LASIK in der Lage die sphärischen Aberrationen statistisch unverändert zu halten. Dieser Effekt fand sich hingegen nach konventioneller LASIK nicht, vielmehr stiegen die sphärischen Aberrationen signifikant an. Diese Ergebnisse konnten im hochmyopen Korrekturbereich allerdings nicht bestätigt werden. Hier wiesen die sphärischen Aberrationen nach beiden Ablationsprofilen signifikant belegte Verschlechterungen in vergleichbarer Weise auf.

Mit Hilfe der wellenfrontgeführten LASIK gelang es im Korrekturbereich -1,0 bis -5,0 dpt SÄ bis auf zwei Ausnahmen keine Aberrationen in der 4. und 5. Ordnung statistisch signifikant zu induzieren. Bei diesen beiden Ausnahmen handelt es sich um den horizontalen Quadrafoil und den vertikalen Pentafoil, zwei zahlenmäßig sehr kleine Aberrationen, die am äußeren Rand der Zernike-Pyramide lokalisiert sind. Ihr Einfluß auf den optische Seheindruck ist eher als gering einzustufen [Applegate et al. 2002]. Hier weist die wellenfrontgeführte LASIK deutliche Vorteile auf, denn die konventionelle LASIK induzierte signifikant

sowohl im niedrig- als auch im hochmyopen Behandlungsbereich Aberrationen in der 4. und 5. Ordnung.

Da durch die zentrale Hornhautabflachung bei myopen Korrekturen die damit schwächer werdende Asphärizität der Hornhaut mit einem starken Anstieg sphärischer Aberrationen einhergeht, steigt der HO-RMS-Wert, ohne das eine Berücksichtigung der übrigen Aberrationen möglich ist [Yoon et al. 2005]. Insbesondere Aberrationen 3. Ordnung profitieren von der wellenfrontgeführten LASIK, sowohl im niedrigmyopen als auch im hochmyopen Bereich. Trotz signifikant erhöhtem HO-RMS-Wert im Korrekturbereich -5,1 bis -10,5 dpt SÄ blieben alle Aberrationen der 3. Ordnung statistisch unverändert. Es zeigte sich vielmehr eine Tendenz zur Verbesserung (horizontaler Trefoil). Auch in der Studie von Kohnen et al. [2004 a] waren die Aberrationen 3. Ordnung nach Wellenfront-LASIK stabil. Mrochen et al. [2001 a] berichteten bei der wellenfrontgeführten LASIK sogar über signifikante Verbesserungen des vertikalen Kommas. Dagegen sind in der hier zugrunde liegenden Untersuchung nach konventioneller LASIK in beiden Behandlungsbereichen alle Aberrationen 3. Ordnung angestiegen (signifikant: vertikales Koma). Diese Ergebnisse finden ihre Bestätigung in der Studie von Morreno-Barriuso et al. [2001] über konventionelle LASIK. Sie berichteten über den postoperativen signifikanten Anstieg des HO-RMS der 3. Ordnung auf den zweifachen Wert.

Bei den Ursachen für die Zunahme von Aberrationen höherer Ordnung nach LASIK sind folgende Schwerpunkte zu berücksichtigen:

Corneale Asphärizität

Die okulären Medien Hornhaut und Linse unterliegen dem Prinzip der Asphärizität [Mrochen und Büeler 2008]. Ophthalmologisch wird die Asphärizität im Sinne von rotationssymmetrischen Flächen definiert, die von der klassischen Kugelform (sphärische Fläche) abweichen. Dabei ändern sich die Krümmungsradien kontinuierlich [Kohnen und Klaproth 2008]. Die physiologische Form der Hornhaut ist in aller Regel prolat, das heißt, sie flacht sich vom Zentrum zur Peripherie hin ab [Mrochen und Büeler 2008, Neuhann et al. 2008]. Bei der myopen LASIK kommt es zu einer zentralen Abflachung der Hornhaut.

Dies führt zu einer oblaten Verformung der Hornhaut, das heißt, die Hornhaut stellt sich zur Peripherie hin auf [Holladay et al. 1999, Kaisermann et al. 2004, Yamane et al. 2004]. Dadurch wird auch das natürliche Zusammenspiel zwischen Hornhaut und Linse verändert. Die Hornhaut weist mit starken interindividuellen Schwankungen weitgehend positive sphärische Aberrationen auf. Die Linse verfügt in einem jugendlichen Auge über negative sphärische Aberrationen, die mit zunehmendem Alter positiv werden [Kohnen und Klaproth 2008]. Durch eine LASIK-Operation wird die natürliche Asphärizität derart verändert, dass es zu einer Zunahme von Aberrationen höherer Ordnung kommt, was beide Ablationsprofile betrifft. Aber die wellenfrontgeführte LASIK ist mit ihrem individualisierten Ablationsprofil in der Lage, präoperativ bestehende Aberrationen höherer Ordnung zu reduzieren und den postoperativen Wellenfrontwert stabil zu halten oder darüber hinaus zu verbessern.

Fluktuationen der Aberrationen höherer Ordnung

Die aberrometrische Messung ist letztlich nur eine Momentaufnahme. Ursachen für Schwankungen sind Tränenfilmveränderungen z.B. Tränenfilmaufrisse sowie Mikrofluktuationen durch Akkommodation [Bühren und Kohnen 2007 a, Kohnen et al. 2004 a]. Auch mit zunehmendem Alter ändern sich die Aberrationen höherer Ordnung [Mrochen et al. 2000, Kim et al. 2004]. Über den Einfluß von pupillendilatierenden Augentropfen auf die Aberrationen des Auges bestehen in der Literatur unterschiedliche Meinungen. Von Kohnen et al. [2004 a] wurden die Änderungen der höheren Brechungsfehler durch medikamentöse Mydriasis als vernachlässigbar klein beschrieben. Gießler et al. [2002] hingegen publizierten deutliche Änderungen von Defocus und Astigmatismus nach Applikation von Mydriatika.

Um den Einfluß der hier genannten Fluktuationen zu minimieren und ein aussagefähiges aberrometrisches Ergebnis zu erhalten, wurde bei den eigenen Untersuchungen die Aberrometrie pro Auge fünfmal durchgeführt und ein Mittelwert aus den 3 zuverlässigsten Messungen gebildet.

Wundheilung

Laser-Gewebe-Wechselwirkungen und der individuelle Heilungsverlauf können die Ursache für ganz unterschiedlichen Ergebnisse nach einer LASIK-Operation sein [Mrochen et al. 2006]. Die corneale Wundheilung stabilisiert in der Regel die operativ veränderte neue Form der Hornhaut, kann aber auch durch eine Hyperplasie des cornealen Epithels zu Regressionen führen, obwohl ein Remodeling der Cornea nach LASIK als sehr minimal eingestuft wird [Seiler et al. 2000]. Die Wundheilung ist als Hauptursache der refraktiven Instabilität nach LASIK anzusehen [Moreno-Barriuso et al. 2001]. Unterschiedliche Wundheilungsverläufe aufgrund des Ablationsprofils sind bisher nicht bekannt. Es ist auch eher unwahrscheinlich, da die chirurgischen Methoden (Laser, Mikrokeratom) identisch sind. Lediglich der Laseralgorithmus ist unterschiedlich.

Dezentrierung der Ablation

Subklinische wie auch grobe Dezentrierungen der Behandlung gegenüber der Sehachse können Aberrationen vor allem Astigmatismus und Koma induzieren [Taylor et al. 2000, Moreno-Barriuso et al. 2001, Kohnen und Bühren 2004 b, Bühren und Kohnen 2007 b] und postoperativ Blendung und beeinträchtigtes Kontrastsehen nach sich ziehen [Taylor et al. 2000]. Seit dem Einsatz von Eyetrackern ist diese Problematik deutlich rückläufig [Taylor et al. 2000, Kohnen und Bühren 2004 b]. Auch in der hier zugrunde liegenden Studie kamen Eyetracker zum Einsatz, die Augenbewegungen und Mikrosakkaden ausgleichen. Das Eyetracking-System erkennt die Bewegungen anhand der Pupillenstellung und gleicht diese aus. Diese Eyetracking-Methode ist allerdings nicht in der Lage, allen Augenbewegungen zu folgen [Taylor et al. 2000]. Vor allem kleine, plötzliche Augenbewegungen sowie schnelle Sakkaden mit einer Frequenz größer als die des Eyetracking-Sensors werden nicht erkannt. Demzufolge kann es auch unter dem Einsatz von Eyetrackern zu Dezentrierungen kommen. Darüber hinaus kann eine Zyklorotation des Auges bei Positionsveränderung des Kopfes (Messung im Sitzen, Behandlung im Liegen) Ursache einer Dezentrierung und der damit zusammenhängenden Induktion von Aberrationen höherer Ordnung sein [Moreno-Barriuso et al. 2001, Kohnen und Bühren 2004 b, Mrochen et al. 2006]. Eine neue Generation von Eyetrackern ermöglicht neben Mikrosakkaden auch Torsionsbewegungen des Augapfels auszugleichen.

Grundlage ist das Prinzip der Iriskennung. Eine Verringerung astigmatischer Fehler sind beschrieben worden [Hammer 2006]. Folglich wäre der generelle Einsatz von Rotationseyetrackern sinnvoll, um die Vorteile des asphärischen Prinzips der wellenfrontgeführten LASIK besser ausnutzen zu können [Hammer 2006]. Über die Zyklotorsion des Auges bei Positionveränderung vom Sitzen zum Liegen herrschen in der Literatur geteilte Meinungen. Kohnen und Bühren [2004 b], Mrochen et al. [2006] und Moreno-Barriuso et al. [2001] bejahen sie, während Becker et al. in ihrer video-okulographischen Studie [2005] keine signifikante Änderung der Zyklotorsion zwischen sitzender und liegender Position publizierten.

Die refraktiven Ergebnisse der hier zugrunde liegenden Untersuchungen zeigen, dass sowohl mit der konventionellen als auch mit der wellenfrontgeführten LASIK sehr genaue Korrekturen möglich sind. Nach konventioneller LASIK lagen 93,1% und nach wellenfrontgeführter LASIK 89,7% der operierten Augen innerhalb von $\pm 0,5$ dpt SÄ um die Emmetropie. Keines der beiden Ablationsprofile zeigte sich hier im Vorteil. Eine geringe Unterkorrektur im Sinne einer kleinen Restmyopie, wie die eigenen Untersuchungen zeigen, ist anzustreben, um eine Überkorrektur und eine daraus resultierende Hyperopie zu vermeiden. Eine geringe Unterkorrektur tolerieren die Patienten in der Regel sehr gut, denn sie sind an die Myopie adaptiert. Eine Überkorrektur im Sinne einer Hyperopie stellt eine komplett neue Situation für den Patienten dar, die gegebenenfalls zu starken Anpassungsstörungen bis hin zur Revisions-LASIK führen kann.

Eine Verbesserung der Sehschärfe auf 2,0 (-0,3 LogMAR) nach wellenfrontgeführter LASIK, wie es Seiler et al. [2000] und Mrochen et al. [2000] publizierten, konnte nicht bestätigt werden. Allerdings beruhte die Studie von Mrochen et al. [2000] auf einer Auswertung von 3 ausgewählten Augen (präoperatives sphärischen Äquivalent bis 5 dpt). Die Studie von Seiler et al. [2000] basierte auf 15 Augen (präoperatives sphärischen Äquivalent bis 8 dpt). Den Ergebnisse der eigenen Untersuchungen hingegen liegt eine Fallzahl von 116 Augen zugrunde (präoperatives sphärischen Äquivalent bis 10,5 dpt). Hochmyope Patienten haben im Vergleich zu niedrigmyopen Patienten häufig einen etwas geringeren bestkorrigierten Visus [Mutyala et al. 2000]. Die eigenen Daten zeigen, daß 87,9% der Patienten mit konventioneller und 82,8% mit

Wellenfront-LASIK einen unkorrigierten Visus von 0,8 (0,1 LogMAR) oder besser erreichten. Hinsichtlich der postoperativen Sehschärfe zeigten beide Ablationsprofile vergleichbare Ergebnisse. Sehschärfen von 1,6 (-0,2 LogMAR) wurden nur im Einzelfall erreicht. Bei den meisten dieser Einzelfälle betrug bereits der präoperative bestkorrigierte Visus 1,6 (-0,2 LogMAR), so dass nicht von einer operationsbedingten Verbesserung der Sehschärfe ausgegangen werden kann. Das eine „supranormale“ Sehstärke (2,0 oder besser) auch nach wellenfrontgeführter LASIK eher eine Ausnahmen ist, bestätigten auch Hammer et al. [2004] und Kohnen und Bühren [2004 b]. Wie die Resultate der vorgestellten Untersuchungen zeigen, sind die refraktiven Ergebnisse nach konventioneller und wellenfrontgeführter LASIK vergleichbar. Sowohl beim Vergleich der Hauptgruppen als auch nach Differenzierung in Untergruppen zeigten sich bezüglich postoperativer Sehschärfe und Refraktion keine signifikanten Unterschiede zwischen den beiden Ablationsprofilen.

Auf die visuellen Ergebnisse der vorgestellten Untersuchungen wird bewusst nicht weiter eingegangen, da die klassische Visusprüfung schwarze Optotypen auf weißem Untergrund verwendet, was eine eher unphysiologische und im Alltag nur selten vorkommende Situation darstellt. Kaisermann et al. [2004] berichteten, dass die klassische Visusprüfung aufgrund des Einsatzes von Hochkontrastobjekten subtile Sehschärfenverluste nicht aufzudecken vermag. Änderungen des Seheindrucks nach LASIK werden durch Tests mit Niedrigkontrastobjekten wie auch durch Untersuchungen bei niedriger Beleuchtungsstärke besser erkannt [Holladay et al.1999]. Deshalb standen im Mittelpunkt dieser Untersuchungen das Dämmerungssehen, die Blendempfindlichkeit und die Kontrastsensitivität als klinische Parameter, um mögliche Unterschiede in der optischen Qualität nach einer der beiden Behandlungsverfahren herauszuarbeiten.

Blendung, Halos (Lichthöfe um Lichtquellen) und eingeschränktes Dämmerungssehen sind weitreichend bekannte und häufig publizierte Probleme nach einer LASIK-Operation [Pop und Payette 2004, Hammer et al. 2004, Kohnen et al. 2006]. Knorz et al. [1999] berichteten in ihrer Studie zum Dämmerungssehvermögen nach konventioneller LASIK über Verschlechterungen

des Dämmerungssehens mit Blendung sowohl im hohen als auch im niedrigen Korrekturbereich. Diese Ergebnisse wurden durch die eigenen Untersuchungen nicht nur für die konventionelle sondern auch für die wellenfrontgeführte LASIK bestätigt, wobei bei beiden die Verschlechterungen im hochmyopen Korrekturbereich ausgeprägter (statistisch signifikant) waren als im niedrigmyopen Korrekturbereich. Zu vergleichbaren Ergebnissen kamen auch Pop und Payette [2004]. Aus ihrer Untersuchung ging hervor, dass eine initiale Myopie > 5 dpt einen 2,8-fachen Risikofaktor für Nachtsichtprobleme (z.B. Halos) mit sich bringt.

Bezüglich des Dämmerungssehens ohne Blendung waren die eigenen Ergebnisse zwischen konventioneller LASIK und Wellenfront-LASIK vergleichbar. Im Bezug auf Dämmerungssehen und Blendungsempfindlichkeit fand sich kein Unterschied zwischen beiden Ablationsprofilen. Die wellenfrontgeführte LASIK zeigte trotz postoperativ reduziertem HO-RMS-Wertes keinen Vorteil. Organische Ursachen der Reduzierung des Dämmerungssehens nach beiden Ablationsprofilen wie Striae, Epithelwucherungen, Narben, Flapdislokation oder andere pathologische Befunde können ausgeschlossen werden, da Patienten mit dieser Problematik nicht in die Untersuchungen einbezogen wurden. Viel mehr muß als Grund der Nachtsichtproblematik sowohl nach konventioneller als auch nach wellenfrontgeführter LASIK die multifokale Hornhaut gesehen werden [Knorz et al. 1999]. Idealerweise sollte die zentrale Ablationszone größer sein als die mesopische Pupille, um auch bei dunklen Umfeldbedingungen (Nacht) ein scharfes Bild zu gewährleisten, dies ist jedoch nicht immer möglich. Besonders die Korrekturen hoher Myopien können problematisch sein, da die Ablationstiefe limitiert ist und aufgrund der Wahrung der Hornhautstabilität oftmals eine kleinere Ablationszone gewählt werden muss. Dies führt bei weiter Pupille (z.B. nachts) zu einem unscharfen Bild auf der Netzhaut aufgrund des Bildanteils, der durch den peripher der Korrekturzone gelegenen Teil der Hornhaut erzeugt wird, was zu einer Verschlechterung des Dämmerungssehens sowie die Wahrnehmung von Halos zur Folge haben kann. So fanden sich bei den eigenen Untersuchungen besonders im Korrekturbereich $-5,1$ bis $-10,5$ dpt \ddot{A} vermehrt Diskrepanzen zwischen Ablationszone und mesopischer Pupille im Sinne einer kleineren Ablationszone im Vergleich zur mesopischen Pupille. Dies könnte die

Reduzierung des Dämmerungssehens vor allem nach hochmyopen Korrekturen erklären.

Fan-Paul et al. [2002] berichteten in ihrer Studie über Nachtsichtprobleme nach Refraktivchirurgie über die erstaunliche Leistung des Gehirns, sich an neue Situationen und Stimuli zu adaptieren. Sie führten die Tatsache, dass 1 Jahr nach der LASIK-Operation nur noch ein geringer Prozentsatz der Patienten über Nachtsichtprobleme klagte, zum Teil darauf zurück.

In der internationalen Literatur [Quesnel et al. 2004] wurde wiederholt über eine eingeschränkte Sehqualität trotz einem Visus von 1,0 nach LASIK berichtet. In diesem Zusammenhang erklärten Yamane et al. [2004], dass Einschränkungen des Seheindrucks durch die Untersuchung der Kontrastempfindlichkeit besser reflektiert werden als durch die klassische Hochkontrast-Visusprüfung. Die Kontrastsensitivität ist ein guter klinischer Parameter zur Einschätzung des Sehens im Alltag und kann Erklärungen zu einem inadäquaten Seheindruck bei normalem Visus nach refraktiver Chirurgie liefern. Montés-Micó et al. [2003] berichteten über die Kontrastsensitivität nach konventioneller LASIK über signifikante Verschlechterungen unter mesopischen Bedingungen vor allem im Bereich der kleinen Ortsfrequenzen (12 cpd, 18 cpd). Dies entspricht den Ergebnissen der vorgelegten Untersuchung, bei der sich ebenfalls nach konventioneller LASIK das Kontrastsehen bei einem Beleuchtungslevel von 3 cd/m² auf den Ortsfrequenzen 12 cpd und 18 cpd signifikant reduzierte. Vergleichbare Beobachtungen publizierten auch Holladay et al. [1999], Kim et al. [2004] und Yamane et al. [2004]. Die Ursachen für die verminderte Kontrastsensitivität nach konventioneller LASIK können einerseits corneale Mikroirregularitäten wie Haze oder Striae sein [Holladay et al. 1999, Montés-Micó et al. 2003, Quesnel et al. 2004] oder andererseits induzierte Aberrationen [Holladay et al. 1999, Montés-Micó et al. 2003, Quesnel et al. 2004, Kaisermann et al. 2004, Yamane et al. 2004]. Andere Ursachen wie intraokularer Druckanstieg, retinale Pathologien oder anderer postoperative Komplikationen kommen, wie bereits erwähnt, eher nicht in Betracht, da Patienten mit einer solchen Problematik nicht in die vorgelegten Untersuchungen eingeschlossen wurden. Corneale Irregularitäten können als Grund weitgehend ausgeschlossen werden, da die Patienten mit deutlichem Haze oder Striae ausgeschlossen wurden und

der postoperative Kontrolltermin der Studie so gewählt wurde, dass die in der ersten Zeit postoperativ möglichen transienten cornealen Unregelmäßigkeiten aufgrund des Wundheilungsprozesses bereits nicht mehr nachweisbar sind, was die Untersuchungen von Quesnel et al. [2004] bestätigen. Sie berichteten über postoperative Microstriae, die circa 6 Monate nach der LASIK nicht mehr nachgewiesen werden konnten. Bleiben als mögliche Ursache für das verminderte Kontrastsehen die induzierten Aberrationen. Die signifikant positive Korrelation zwischen dem Ausmaß der postoperativen Verschlechterung der Kontrastsensibilität und der Zunahme der HO-RMS beschrieben Yamane et al. [2004] in ihrer Publikation über Aberrationen höherer Ordnung und Kontrastsensitivität nach konventioneller LASIK. Auch in den eigenen Untersuchungen war der HO-RMS nach konventioneller LASIK stark angestiegen infolge der Induktion von Brechungsfehlern höherer Ordnung (vor allem Koma und sphärische Aberrationen) durch die LASIK selbst.

Die wellenfrontgeführte LASIK ist aufgrund ihres Ablationsprofils in der Lage, präoperativ bestehende Aberrationen höherer Ordnung zu reduzieren und damit die Induktion von neuen Aberrationen im Vergleich zur konventionellen LASIK zu mindern, was auch die hier vorliegenden Untersuchungen belegen. Demzufolge sollte das Kontrastsehen nach wellenfrontgeführter LASIK weniger eingeschränkt sein als nach konventioneller LASIK. Die von Kaisermann et al. [2004] beschriebene Verbesserung der postoperativen Kontrastempfindlichkeit nach wellenfrontgeführter LASIK von Myopien bis -5 dpt konnte durch die eigenen Untersuchungen bestätigt werden. Auch im hochmyopen Korrekturbereich zeigte die wellenfrontgeführte LASIK Vorteile. Gegenüber der konventionellen LASIK war das postoperative Kontrastsehen statistisch unverändert mit Tendenzen zur Verbesserung.

Einige Autoren [Fan-Paul et al. 2002, Montés-Micó et al. 2003, Kaisermann et al. 2004] berichteten über Regenerationszeiten nach LASIK für Kontrastsensibilität bis zu einem Jahr. Dies ist insofern zu hinterfragen, da die Ursache des reduzierten Kontrastsehens vermutlich in den neu induzierten Aberrationen zu sehen ist und der damit einhergehenden oblaten Form der Hornhaut, die permanent ist, was auch Holladay et al. [1999] in ihrer Publikation bestätigen.

Die Erhebung der subjektiven Sehqualität erfolgte durch einen Fragebogen. In Ermangelung eines etablierten Fragebogens [Kohnen et al. 2006] wurde ein Fragebogen in Anlehnung an standardisierte Fragebögen aus anderen Fachbereichen erstellt. Auch Quesnel et al. [2004] nutzten in ihrer Studie über LASIK einen Fragebogen zur Komplettierung der Untersuchungen zur Sehqualität nach einem solchen refraktiv-chirurgischen Eingriff. Die Auswertung der Fragebögen konnte den Vorteil der wellenfrontgeführten LASIK auf dem Gebiet der Kontrastsensitivität nicht bestätigen. Vielmehr zeigten sich konventionelle und wellenfrontgeführte LASIK im Bezug auf die subjektive Sehqualität vergleichbar. Auch Bühren und Kohnen [2007 b] bestätigten, dass hinsichtlich der subjektiven Zufriedenheit und der subjektiven funktionellen Ergebnisse nur geringe Unterschiede zwischen konventioneller und wellenfrontgeführter LASIK zu beobachten waren. Eine Ursache dafür könnte die Komplexität des Sehvorganges sein, der nicht allein durch die optischen Eigenschaften des Auges bestimmt wird. Der subjektive Seheindruck wird durch unterschiedliche Größen auf mehreren Ebenen (Anatomie, Optik, Funktion und Wahrnehmung) beeinflusst [Kohnen et al. 2006]. Mrochen et al. [2006] bezeichneten den Vorgang des „Sehens“ als Verarbeitungsergebnis höherer Zentren. Die neurale Bildverarbeitung und der subjektive Seheindruck unterliegen einer hohen interindividuellen Variabilität [Kohnen et al. 2006].

6. Zusammenfassung

Die LASIK gewinnt zunehmend an Bedeutung als Methode der Wahl zur Korrektur von Myopien. Vor diesem Hintergrund bieten sowohl die konventionelle LASIK als auch die wellenfrontgeführte LASIK 2 sichere Verfahren zur Korrektur der Myopie und der Myopie mit kombiniertem Astigmatismus. Die eigenen Untersuchungen konnten zeigen, dass der Zielbereich von $\pm 0,5$ dpt SÄ um die Emmetropie in fast allen Fällen erreicht werden konnte. Eine Revisions-LASIK war nicht notwendig. Die Patientenzufriedenheit betrug 98 %, was auch durch die Untersuchung von Bailey et al. [2003] zu Patientenzufriedenheit nach LASIK bestätigt wurde.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass wellenfrontgeführte LASIK-Behandlungen die Möglichkeit bieten, in einem Korrekturbereich bis -5,0 dpt SÄ vorbestehende Aberrationen höherer Ordnung zu reduzieren. Es zeigte sich in den eigenen Untersuchungen, dass 6 Monate postoperativ ein günstiger Effekt auf die postoperative Wellenfront sowie auf das Kontrastsehen der Patienten im Vergleich zur konventionellen LASIK erkennbar ist. Kein Vorteil war im Bezug auf das Dämmerungssehen und die Blendempfindlichkeit zu beobachten. Ob dieser Effekt dauerhaft ist, kann nur nach einem längeren Nachbeobachtungszeitraum bewertet werden, sodass sich daraus weiterführende Untersuchungen unter besonderer Berücksichtigung des postoperativen Langzeitverlaufs (> 6 Monate) für die Zukunft anschließen sollten, um die Wertigkeit in der klinischen Praxis abschätzen zu können.

Schlußfolgernd sollte Berücksichtigung finden, dass geringste Störungen der Flapadaptation (z.B. Mikrostriae) oder der Wundheilung (z.B. Haze) Einfluss auf die Homogenität des cornealen Gewebes haben und den Seheindruck verschlechtern können.

Zum Zeitpunkt der Untersuchung konnten nur präoperativ gemessene Aberrationen in das Ablationsprofil der wellenfrontgeführten LASIK integriert werden, sodass man nicht von einer Wellenfrontkorrektur, sondern besser von einer Korrektur bestimmter Aberrationen sprechen kann [Spraul 2004]. Da aber bekannt ist, dass z.B. sphärische Aberrationen bei der zentralen Ablation induziert werden, ist es perspektivisch wünschenswert, mittels geeigneter Ablationsprofile auch bei höheren Korrekturen die corneale Asphärizität zu erhalten, um somit die

Vorteile der wellenfrontgeführten LASIK vollständig ausnutzen zu können. Sogenannte asphärische Abtragungsprofile befinden sich bereits in der Entwicklung und wurden auch schon erfolgreich eingesetzt wie Neuhann et al. [2008] berichteten. Ein tieferer peripherer Abtrag sowie ein auf die Korrektur selbst bezogener Abtragsalgorithmus erzeugen die gewünschte prolata Asphäre. In der von Neuhann et al. [2008] publizierten Studie war die Asphärität der Hornhaut in der sphärischen Gruppe signifikant höher im oblaten Bereich als in der sphärischen Gruppe. Allerdings beruhte die Auswertung dieser Studie auf einer Fallzahl von insgesamt nur 18 Patienten.

Trotz modernster Diagnostik- und Therapiemöglichkeiten muss man sich vergegenwärtigen, dass die Korrektur von Aberrationen nicht vollständig möglich ist, da die gemessene Wellenfront physiologischen Schwankungen z. B. Akkommodation [Bühren und Kohnen 2007 b, Kohnen et al. 2004 a] und Alterungsprozessen [Mrochen et al. 2000, Kim et al. 2004] unterliegt. Damit stellen refraktiv-chirurgische Laserbehandlungen immer nur einen zeitbezogen optimierten Therapieansatz dar [Hammer 2006].

7. Literatur

1. Aizawa D, Shimizu K, Kamatsu M, Ito M, Suzuki M, Ohno K, Ouzato H: Clinical outcomes of wavefront-guided laser in situ keratomileusis: 6-month follow-up. *J Cataract Refract Surg* 29 (2003) 1507-1513
2. Applegate RA, Sarver EJ, Khemsara V: Are all aberrations equal? *J Refract Surg* 18 (2002) 556-562
3. Bailey MD, Mitchell GL, Dhaliwal DK, Boxer Wachler BS, Zadnik K: Patient satisfaction and visual symptoms after laser in situ keratomileusis. *Ophthalmology* 110 (2003) 1371-1378
4. Becker R, Krzizok T, Wassill H: Use of preoperative assessment of positionally induced cyclotorsion: a video-oculographic study. *Br J Ophthalmol* 88 (2004) 417-421
5. Becker R, Krzizok T, Wassill H: Lageabhängigkeit der Augenstellung in der torsionalen Ebene bei Patienten ohne Binokularsehen. *Klin Monatsbl Augenheilkd* 222 (2005) 1-4
6. Bühren J, Kohlen T. Anwendung der Wellenfrontanalyse in Klinik und Wissenschaft Teil I. *Ophthalmologie* 104 (2007) 909-925 (a)
7. Bühren J, Kohlen T. Anwendung der Wellenfrontanalyse in Klinik und Wissenschaft Teil II. *Ophthalmologie* 104 (2007) 991-1008 (b)
8. Chalita MR, Xu M, Krueger RR. Correlation of aberration with symptoms using wavefront analysis in eyes after laser in situ keratomileusis. *J Refract Surg* 19 (2003) 682-686
9. Duncker GIW, Gießler S, Wilhelm F: LASIK-Workshop Halle. Handbuch. 2001

10. Fan-Paul NI, Li J, Miller JS, Florakis GJ: Night vision disturbances after corneal refractive surgery. *Surv Ophthalmol* 47 (2002) 533-546
11. Gießler S, Hammer T, Duncker GIW: Aberrometrie in Mydriasis- welche Art der Mydriasis ist zu bevorzugen? *Klin Monatsbl Augenheilkd* 219 (2002) 655-659
12. Ginsburg A P: Next Generation Contrast Sensitivity Testing. Chapter 5, Reprinted from the book *Functional Assessment of Low Vision* by Rosenthal B P, Cole R G. Mosby Elsevier Science (2002); 77-88
13. Hammer T: Korneale Wundheilungsreaktion und deren Modulation sowie mögliche Einflußfaktoren auf die optische Qualität nach refraktiver Hornhautchirurgie. Habilitation 2006, Medizinische Fakultät der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg
14. Hammer T, Gießler S, Duncker GIW: Corneal wound healing after hyperopic PRK and LASIK. *Ophthalmologie* 102 (2005) 39-4
15. Hammer T, Duncker GIW, Gießler: Ergebnisse der wellenfrontgestützten LASIK. *Ophthalmologie* 101 (2004) 824-829
16. Hammond SD, Puri AK, Ambati BK: Quality of vision and patient satisfaction after LASIK. *Curr Opin Ophthalmolgy* 15 (2004) 328-332
17. Holladay JT, Dudeja DR, Chang J: Functional vision and corneal changes after laser in situ keratomileusis determined by contrast sensitivity, glare testing and corneal topography. *J Cataract Refract Surg* 25 (1999) 663-9
18. Kaisermann I, Hazarbassanov R, Varssano D, Grinbaum A: Contrast sensitivity after wave front-guided LASIK. *Ophthalmologie* 2004; 111: 454-457

19. Kim TI, Yang SJ, Tchah H: Bilateral comparison of wavefront-guided versus conventional laser in situ keratomileusis with Bausch and Lomb Zyoptix. J Refract Surg 20 (2004) 432-438
20. Knorz MC, Hugger P, Jendritzka B, Liermann A: Dämmerungssehvermögen nach Myopiekorrektur mittels LASIK. Ophthalmologe 96 (1999) 711-716
21. Kohnen T, Klaproth OK: Asphärische Intraokularlinsen. Ophthalmologe 105 (2008) 234-240
22. Kohnen T, Bühren J, Cichocki M, Kasper T, Terzi E, Ohrloff C: Optische Qualität nach refraktiver Hornhautchirurgie. Ophthalmologe 103 (2006) 184-191
23. Kohnen T, Bühren J, Kühne C, Mirshahi A: Wavefront-guided LASIK with the Zyoptix 3.1 system for the correction of myopia and compound myopic astigmatism with 1-Year follow-up: clinical outcome and change in higher order aberrations. Ophthalmology 111 (2004) 2175-2185 (a)
24. Kohnen T, Bühren J: Derzeitiger Stand der wellenfrontgeführten Hornhautchirurgie zur Korrektur von Refraktionsfehlern. Ophthalmologe 101 (2004) 631-647 (b)
25. Kohnen T: Measuring vision in refractive surgery (editorial) J Cataract Refract Surg 27 (2001) 1897-1898
26. Krentz H: Statistische Analysen und Datenverwaltung mit SPSS in der Medizin. Shaker Verlag, Aachen, 2002
27. Marcos S: Aberrations and visual performance following standard laser vision correction. J Refract Surg 17 (2001) S596-601
28. Montes-Mico R, Espana E, Menezo JL: Mesopic contrast sensitivity function after laser in situ keratomileusis. J Refract Surg 19 (2003) 353-356

29. Moreno-Barriuso E, Lloves JM, Marcos S, Navarro R, Llorente L, Barbero S: Ocular aberrations before and after myopic corneal refractive surgery: LASIK-induced changes measurement with laser ray tracing. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 42 (2001) 1396-1403
30. Mrochen M, Büeler M: Asphärische Optiken. *Ophthalmologie* 105 (2008) 224-233
31. Mrochen M, Hafezi F, Jankov M, Seiler T: Ablationsprofile in der kornealen refraktiven Laserchirurgie. *Ophthalmologie* 103 (2006) 175-183
32. Mrochen M, Kaemmerer M, Seiler T: Clinical results of wavefront-guided laser in situ keratomileusis 3 months after surgery. *J Cataract Refract Surg* 27 (2001) 201-207 (a)
33. Mrochen M, Seiler T: Grundlagen der wellenfrontgeführten refraktiven Hornhautchirurgie. *Ophthalmologie* 98 (2001) 703-714 (b)
34. Mrochen M, Kaemmerer M, Seiler T: Wavefront-guided laser in situ keratomileusis: early results in three eyes. *J Refract Surg* 16 (2000) 116-121
35. Mutyala S, McDonald MB, Scheinblum KA, Ostrick MD, Brint SF, Thompson H: Contrast sensitivity evaluation after laser in situ keratomileusis. *Ophthalmology* 107 (2000) 1864-1876
36. Neuhann T, Neuhann I, Hassel J: Asphärische Profile für refraktiven Laserabtrag an der Hornhaut. *Ophthalmologie* 105 (2008) 241-247
37. Oshika T, Miyata K, Tokunaga T, Samejima T, Amano S, Tanaka S, Hirohara Y, Mihashi T, Maeda N, Fujikado T: Higher order wavefront aberrations of cornea and magnitude of refractive correction in laser in situ keratomileusis. *Ophthalmology* 109 (2002) 1154-1158

38. Phusitphoykai N, Tungsiripat T, Sirikoom, Vongthongsni A: Comparison of conventional versus wavefront-guided laser in situ keratomileusis in the same patient. *J Refract Surg* 19 (2003) 217-220
39. Pop M, Payette Y: Risk factors of night vision complaints after LASIK for myopia. *Ophthalmology* 111 (2004) 3-10
40. Quesnel NM, Lovasik JV, Ferrecci C, Boileau M, Ieraci C: Laser in situ keratomileusis for myopia and the contrast sensitivity function. *J Cataract Refract Surg* 30 (2004) 1209-1218
41. Roberts C: Biomechanics of the cornea and wavefront-guided laser refractive surgery. *J Refract Surg* 18 (2002) 589-592
42. Sachsenweger M: *Augenheilkunde*. 2. Aufl. Thieme, Stuttgart, 2003
43. Schiebler TH, Schmidt W, Zilles K: *Anatomie*. 8. Aufl. Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 1999
44. Seiler T, Mrochen M, Kaemmerer M: Operative correction of ocular aberrations to improve visual acuity. *J Refract Surg* 16 (2000) 619-622
45. Spraul CW: Wellenfrontkorrektur: Ein falsches Versprechen oder nur ein Misnomer. *Klin Monatsbl Augenheilkd* 221 (2004) 455-455
46. Taylor NM, Eikelboom RH, van Sarloos PP, Reid PG: Determining the accuracy of an eye tracking system for laser refractive surgery. *J Refract Surg* 16 (2000) 643-646
47. Thibos LN: Wavefront data reporting and terminology. *J Refract Surg* 17 (2001) 578-583

48. Tietjen A, Müller C, Sekundo W: Ein prospektiver intraindividueller Vergleich zwischen LASIK und LASEK zur Myopiekorrektur. *Ophthalmologie* 105 (2008) 921-926
49. Tumbocon JA, Suresh P, Slamovic A, Rootman D: The effect of laser in situ keratomileusis on low contrast vision. *J Refract Surg* 20 (2004) 689-692
50. Tscherning M: Die monochromatische Aberrationen des menschlichen Auges. *Z Psychol Physiol Sinne* 6 (1894) 456-471
51. Yamane N, Miyata K, Samejima T, Hiraoka T, Kuichi T, Okamoto F, Hirohara Y, Mihashi T, Oshika T: Ocular higher-order aberrations and contrast sensitivity after conventional laser in situ keratomileusis. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 45 (2004) 3986-3990
52. Yoon G, MacRae S, Williams DR, Cox IG: Causes of spherical aberration induced by laser refractive surgery. *J Cataract Refract Surg* 31 (2005) 127-135

8. Anhang 1: Tabellen zur Teststatistik

Tab. 7: Teststatistik des Wellenfrontfehler Konventionelle LASIK, Gruppe Niedrigmyop

Test Statistics(b,c)	
	postop HO-RMS - präop HO-RMS
Z (Prüfgröße)	-4,447(a)
Asymp. Sig. (2-tailed) (Irrtumswahrscheinlichkeit p)	,000

a Based on negative ranks.

b Wilcoxon Signed Ranks Test

c Operationstyp = Konventionelle LASIK, Gruppe Niedrigmyop

Tab. 8: Teststatistik des Wellenfrontfehler Konventionelle LASIK, Gruppe Hochmyop

Test Statistics(b,c)	
	postop HO-RMS – präop HO-RMS
Z (Prüfgröße)	-3,248(a)
Asymp. Sig. (2-tailed) (Irrtumswahrscheinlichkeit p)	,001

a Based on negative ranks.

b Wilcoxon Signed Ranks Test

c Operationstyp = Konventionelle LASIK, Gruppe Hochmyop

Tab. 9: Teststatistik des Wellenfrontfehler Wellenfront - LASIK, Gruppe Niedrigmyop

Test Statistics(b,c)	
	postop HO-RMS - präop HO-RMS
Z (Prüfgröße)	-,806(a)
Asymp. Sig. (2-tailed) (Irrtumswahrscheinlichkeit)	,420

a Based on positive ranks.

b Wilcoxon Signed Ranks Test

c Operationstyp = Wellenfront-LASIK, Gruppe Niedrigmyop

Tab. 10: Teststatistik des Wellenfrontfehler Wellenfront - LASIK, Gruppe Hochmyop

Test Statistics(b,c)	
	postop HO-RMS - präop HO-RMS
Z (Prüfgröße)	-3,608(a)
Asymp. Sig. (2-tailed) (Irrtumswahrscheinlichkeit p)	,000

a Based on negative ranks.

b Wilcoxon Signed Ranks Test

c Operationstyp = Wellenfront, Gruppe Hochmyop

Tab. 11: Teststatistik der Einzelaberrationen, Konventionelle LASIK, Gruppe Niedrigmyop

Statistik für Test(c,d)		
	Z	Asymptotische Signifikanz (2-seitig)
Trefoil x postop - Trefoil x präop	-1,611(a)	,107
Koma x postop - Koma x präop	-1,523(a)	,128
Koma y postop - Koma y präop	-1,969(a)	,049
Trefoil y postop - Trefoil y präop	-,164(a)	,870
Quadradrafoil x postop - Quadrafoil x präop	-3,499(b)	,000
sekundärer Astigmatismus x postop - sekundärer Astigmatismus x präop	-1,986(b)	,047
sphärische Aberrationen postop - sphärische Aberrationen präop	-3,867(a)	,000
sekundärer Astigmatismus y postop - sekundärer Astigmatismus y präop	-3,729(b)	,000
Quadradrafoil y postop - Quadrafoil y präop	-3,757(a)	,000
Pentafoil x postop - Pentafoil x präop	-1,713(a)	,087
sekundärer Trefoil x postop - sekundärer Trefoil x präop	-,301(a)	,763
sekundäres Koma x postop - sekundäres Koma x präop	-,119(b)	,905
sekundäres Koma y postop - sekundäres Koma y präop	-2,634(a)	,008
sekundärer Trefoil y postop - sekundärer Trefoil y präop	-3,150(a)	,002
Pentafoil y postop - Pentafoil y präop	-2,056(a)	,040

a Basiert auf negativen Rängen.

b Basiert auf positiven Rängen.

c Wilcoxon-Test

d Konventionelle LASIK, Niedrigmyop

Tab. 12: Teststatistik der Einzelaberrationen, Konventionelle LASIK, Gruppe Hochmyop

Statistik für Test(c,d)		
	Z	Asymptotische Signifikanz (2-seitig)
Trefoil x postop - Trefoil x präop	-,104(a)	,917
Koma x postop - Koma x präop	-1,686(a)	,092
Koma y postop - Koma y präop	-2,591(a)	,010
Trefoil y postop - Trefoil y präop	-,745(a)	,456
Quadradrafoil x postop - Quadrafoil x präop	-2,337(b)	,019
sekundärer Astigmatismus x postop - sekundärer Astigmatismus x präop	-3,035(b)	,002
sphärische Aberrationen postop - sphärische Aberrationen präop	-3,686(a)	,000
sekundärer Astigmatismus y postop - sekundärer Astigmatismus y präop	-3,582(b)	,000
Quadradrafoil y postop - Quadrafoil y präop	-1,426(a)	,154
Pentafoil x postop - Pentafoil x präop	-2,657(a)	,008
sekundärer Trefoil x postop - sekundärer Trefoil x präop	-,824(a)	,410
sekundäres Koma x postop - sekundäres Koma x präop	-1,963(a)	,050
sekundäres Koma y postop - sekundäres Koma y präop	-2,305(a)	,021
sekundärer Trefoil y postop - sekundärer Trefoil y präop	-,287(a)	,774
Pentafoil y postop - Pentafoil y präop	-2,617(a)	,009

a Basiert auf negativen Rängen.

b Basiert auf positiven Rängen.

c Wilcoxon-Test

d Konventionelle LASIK, Hochmyop

Tab. 13: Teststatistik der Einzelaberrationen, Wellenfront-LASIK, Gruppe Niedrigmyop

Statistik für Test(c,d)		
	Z	Asymptotische Signifikanz (2-seitig)
Trefoil x postop - Trefoil x präop	-,719(a)	,472
Koma x postop - Koma x präop	-1,503(a)	,133
Koma y postop - Koma y präop	-,498(b)	,619
Trefoil y postop - Trefoil y präop	-1,242(b)	,214
Quadradrafoil x postop - Quadrafoil x präop	-2,076(a)	,038
sekundärer Astigmatismus x postop - sekundärer Astigmatismus x präop	-2,417(a)	,016
sphärische Aberrationen postop - sphärische Aberrationen präop	-1,377(b)	,169
sekundärer Astigmatismus y postop - sekundärer Astigmatismus y präop	-3,140(a)	,002
Quadradrafoil y postop - Quadrafoil y präop	-1,194(b)	,233
Pentafoil x postop - Pentafoil x präop	-1,815(b)	,070
sekundärer Trefoil x postop - sekundärer Trefoil x präop	-1,139(b)	,255
sekundäres Koma x postop - sekundäres Koma x präop	-1,715(b)	,086
sekundäres Koma y postop - sekundäres Koma y präop	-1,050(b)	,294
sekundärer Trefoil y postop - sekundärer Trefoil y präop	-1,034(b)	,301
Pentafoil y postop - Pentafoil y präop	-2,309(b)	,021

- a Basiert auf positiven Rängen.
 b Basiert auf negativen Rängen.
 c Wilcoxon-Test
 d Wellenfront-LASIK, Niedrigmyop

Tab. 14: Teststatistik der Einzelaberrationen, Wellenfront-LASIK, Gruppe Hochmyop

Statistik für Test(c,d)		
	Z	Asymptotische Signifikanz (2-seitig)
Trefoil x postop - Trefoil x präop	-,154(a)	,878
Koma x postop - Koma x präop	-,628(b)	,530
Koma y postop - Koma y präop	-,693(b)	,489
Trefoil y postop - Trefoil y präop	-1,103(b)	,270
Quadradrafoil x postop - Quadrafoil x präop	-2,998(a)	,003
sekundärer Astigmatismus x postop - sekundärer Astigmatismus x präop	-2,439(a)	,015
sphärische Aberrationen postop - sphärische Aberrationen präop	-5,083(b)	,000
sekundärer Astigmatismus y postop - sekundärer Astigmatismus y präop	-4,302(a)	,000
Quadradrafoil y postop - Quadrafoil y präop	-3,903(b)	,000
Pentafoil x postop - Pentafoil x präop	-2,545(b)	,011
sekundärer Trefoil x postop - sekundärer Trefoil x präop	-2,841(b)	,004
sekundäres Koma x postop - sekundäres Koma x präop	-2,696(b)	,007
sekundäres Koma y postop - sekundäres Koma y präop	-1,786(b)	,074
sekundärer Trefoil y postop - sekundärer Trefoil y präop	-,238(b)	,812
Pentafoil y postop - Pentafoil y präop	-2,993(b)	,003

- a Basiert auf positiven Rängen.
 b Basiert auf negativen Rängen.
 c Wilcoxon-Test
 d Wellenfront-LASIK, Hochmyop

Tab. 15: Teststatistik des Dämmerungssehens ohne und mit Blendung,
konventionelle LASIK, Gruppe Niedrigmyop

Test Statistics(b,c)		
	N	Exact Sig. (2-tailed)
preop Meso 1:23 ohne Blendung & postop Meso 1:23 ohne Blendung	37	,453(a)
preop Meso 1:5 ohne Blendung & postop Meso 1:5 ohne Blendung	37	,508(a)
preop Meso 1:2,7 ohne Blendung & postop Meso 1:2,7 ohne Blendung	37	1,000(a)
preop Meso 1:2 ohne Blendung & postop Meso 1:2 ohne Blendung	37	1,000(a)
preop Meso 1:23 mit Blendung & postop Meso 1:23 mit Blendung	37	,804(a)
preop Meso 1:5 mit Blendung & postop Meso 1:5 mit Blendung	37	,774(a)
preop Meso 1:2,7 mit Blendung & postop Meso 1:2,7 mit Blendung	37	1,000(a)
preop Meso 1:2 mit Blendung & postop Meso 1:2 mit Blendung	37	1,000(a)

a Binomial distribution used.

b McNemar Test

c Konventionelle LASIK, Niedrigmyop

Tab. 16: Teststatistik des Dämmerungssehens ohne und mit Blendung,
konventionelle LASIK, Gruppe Hochmyop

Test Statistics(b,c)		
	N	Exact Sig. (2-tailed)
preop Meso 1:23 ohne Blendung & postop Meso 1:23 ohne Blendung	21	,625(a)
preop Meso 1:5 ohne Blendung & postop Meso 1:5 ohne Blendung	21	,125(a)
preop Meso 1:2,7 ohne Blendung & postop Meso 1:2,7 ohne Blendung	21	,109(a)
preop Meso 1:2 ohne Blendung & postop Meso 1:2 ohne Blendung	21	,065(a)
preop Meso 1:23 mit Blendung & postop Meso 1:23 mit Blendung	21	,070(a)
preop Meso 1:5 mit Blendung & postop Meso 1:5 mit Blendung	21	,039(a)
preop Meso 1:2,7 mit Blendung & postop Meso 1:2,7 mit Blendung	21	,012(a)
preop Meso 1:2 mit Blendung & postop Meso 1:2 mit Blendung	21	,125(a)

a Binomial distribution used.

b McNemar Test

c Konventionelle LASIK, Hochmyop

Tab. 17: Teststatistik des Dämmerungssehens ohne und mit Blendung,
Wellenfront-LASIK, Gruppe Niedrigmyop

Test Statistics(b,c)		
	N	Exact Sig. (2-tailed)
preop Meso 1:23 ohne Blendung & postop Meso 1:23 ohne Blendung	18	1,000(a)
preop Meso 1:5 ohne Blendung & postop Meso 1:5 ohne Blendung	18	,500(a)
preop Meso 1:2,7 ohne Blendung & postop Meso 1:2,7 ohne Blendung	18	,453(a)
preop Meso 1:2 ohne Blendung & postop Meso 1:2 ohne Blendung	18	,774(a)
preop Meso 1:23 mit Blendung & postop Meso 1:23 mit Blendung	18	,344(a)
preop Meso 1:5 mit Blendung & postop Meso 1:5 mit Blendung	18	1,000(a)
preop Meso 1:2,7 mit Blendung & postop Meso 1:2,7 mit Blendung	18	1,000(a)
preop Meso 1:2 mit Blendung & postop Meso 1:2 mit Blendung	18	1,000(a)

a Binomial distribution used.

b McNemar Test

c Wellenfront-LASIK, Niedrigmyop

Tab. 18: Teststatistik des Dämmerungssehens ohne und mit Blendung, Wellenfront-LASIK, Gruppe Hochmyop

Test Statistics(b,c)		
	N	Exact Sig. (2-tailed)
preop Meso 1:23 ohne Blendung & postop Meso 1:23 ohne Blendung	40	,774(a)
preop Meso 1:5 ohne Blendung & postop Meso 1:5 ohne Blendung	40	,039(a)
preop Meso 1:2,7 ohne Blendung & postop Meso 1:2,7 ohne Blendung	40	,022(a)
preop Meso 1:2 ohne Blendung & postop Meso 1:2 ohne Blendung	40	,012(a)
preop Meso 1:23 mit Blendung & postop Meso 1:23 mit Blendung	40	,022(a)
preop Meso 1:5 mit Blendung & postop Meso 1:5 mit Blendung	40	,003(a)
preop Meso 1:2,7 mit Blendung & postop Meso 1:2,7 mit Blendung	40	,013(a)
preop Meso 1:2 mit Blendung & postop Meso 1:2 mit Blendung	40	,012(a)

a Binomial distribution used.

b McNemar Test

c Wellenfront-LASIK, Hochmyop

Tab. 19: Teststatistik der Kontrastsensitivität, konventionelle LASIK, Gruppe Niedrigmyop

Statistik für Test(c,d)		
	Z	Asymptotische Signifikanz (2-seitig)
85cd 1,5cpd präop - 85cd 1,5cpd postop	-,135(a)	,893
85cd 3cpd präop - 85cd 3cpd postop	-,136(b)	,892
85cd 6cpd präop - 85cd 6cpd postop	-1,378(b)	,168
85cd 12cpd präop - 85cd 12cpd postop	-,169(b)	,866
85cd 18cpd präop - 85cd 18cpd postop	-2,371(b)	,018
3cd 1,5cpd präop - 3cd 1,5cpd postop	-1,022(b)	,307
3cd 3cpd präop - 3cd 3cpd postop	-1,778(b)	,075
3cd 6cpd präop - 3cd 6cpd postop	-2,207(b)	,027
3cd 12cpd präop - 3cd 12cpd postop	-1,832(b)	,067
3cd 18cpd präop - 3cd 18cpd postop	-2,675(b)	,007

a Basiert auf negativen Rängen.

b Basiert auf positiven Rängen.

c Wilcoxon-Test

d konventionelle LASIK, Niedrigmyop

Tab. 20: Teststatistik der Kontrastsensitivität, konventionelle LASIK, Gruppe Hochmyop

Statistik für Test(c,d)		
	Z	Asymptotische Signifikanz (2-seitig)
85cd 1,5cpd präop - 85cd 1,5cpd postop	-2,066(a)	,039
85cd 3cpd präop - 85cd 3cpd postop	-2,041(a)	,041
85cd 6cpd präop - 85cd 6cpd postop	-1,572(a)	,116
85cd 12cpd präop - 85cd 12cpd postop	-1,214(a)	,225
85cd 18cpd präop - 85cd 18cpd postop	-1,753(b)	,080
3cd 1,5cpd präop - 3cd 1,5cpd postop	-1,725(a)	,084
3cd 3cpd präop - 3cd 3cpd postop	-,333(a)	,739
3cd 6cpd präop - 3cd 6cpd postop	-,106(b)	,915
3cd 12cpd präop - 3cd 12cpd postop	-2,032(b)	,042
3cd 18cpd präop - 3cd 18cpd postop	-1,997(b)	,046

a Basiert auf negativen Rängen.

b Basiert auf positiven Rängen.

c Wilcoxon-Test

d konventionelle LASIK, Hochmyop

Tab. 21: Teststatistik der Kontrastsensitivität, Wellenfront-LASIK, Gruppe Niedrigmyop

Statistik für Test(c,d)		
	Z	Asymptotische Signifikanz (2-seitig)
85cd 1,5cpd präop - 85cd 1,5cpd postop	-2,530(a)	,011
85cd 3cpd präop - 85cd 3cpd postop	-1,761(a)	,078
85cd 6cpd präop - 85cd 6cpd postop	-1,684(a)	,092
85cd 12cpd präop - 85cd 12cpd postop	-,943(a)	,345
85cd 18cpd präop - 85cd 18cpd postop	-,169(a)	,866
3cd 1,5cpd präop - 3cd 1,5cpd postop	-,542(a)	,588
3cd 3cpd präop - 3cd 3cpd postop	-,598(a)	,550
3cd 6cpd präop - 3cd 6cpd postop	-,421(b)	,674
3cd 12cpd präop - 3cd 12cpd postop	-,889(b)	,374
3cd 18cpd präop - 3cd 18cpd postop	-1,272(b)	,203

a Basiert auf negativen Rängen.

b Basiert auf positiven Rängen.

c Wilcoxon-Test

d wellenfrontgeführte LASIK, Niedrigmyop

Tab. 22: Teststatistik der Kontrastsensitivität, Wellenfront-LASIK, Gruppe Hochmyop

Statistik für Test(c,d)		
	Z	Asymptotische Signifikanz (2-seitig)
85cd 1,5cpd präop - 85cd 1,5cpd postop	-,538(a)	,590
85cd 3cpd präop - 85cd 3cpd postop	-,709(b)	,478
85cd 6cpd präop - 85cd 6cpd postop	-,256(b)	,798
85cd 12cpd präop - 85cd 12cpd postop	-,904(b)	,366
85cd 18cpd präop - 85cd 18cpd postop	-,386(a)	,700
3cd 1,5cpd präop - 3cd 1,5cpd postop	-,307(b)	,759
3cd 3cpd präop - 3cd 3cpd postop	-,134(b)	,894
3cd 6cpd präop - 3cd 6cpd postop	-,197(a)	,844
3cd 12cpd präop - 3cd 12cpd postop	-,490(b)	,624
3cd 18cpd präop - 3cd 18cpd postop	-,617(b)	,537

a Basiert auf negativen Rängen.

b Basiert auf positiven Rängen.

c Wilcoxon-Test

d wellenfrontgeführte LASIK, Hochmyop

9. Anhang 2: Fragebogen

Dämmerungssehen

1. Haben Sie Probleme beim Sehen im Dunkeln z.B. Autofahren im Dunkeln?
nie selten manchmal oft immer
2. Wie stark fühlen Sie sich dadurch belastet?
überhaupt nicht ein wenig mäßig ziemlich sehr
3. War das schon vor der Operation so?
ja nein
4. Hat sich Ihr Dämmerungssehen nach der Operation im Vergleich zu vorher verbessert?
Ja, sehr viel
Ja, etwas
Nein, es ist gleichgeblieben
Nein, es hat sich etwas verschlechtert
Nein, es hat sich sehr verschlechtert

Blendempfindlichkeit

1. Haben Sie das Gefühl geblendet zu sein?
nie selten manchmal oft immer
2. Wie stark fühlen Sie sich dadurch belastet?
überhaupt nicht ein wenig mäßig ziemlich sehr
3. War das schon vor der Operation so?
ja nein
4. Hat sich Ihre Blendempfindlichkeit nach der Operation im Vergleich zu vorher verbessert?
Ja, sehr viel
Ja, etwas
Nein, es ist gleichgeblieben
Nein, es hat sich etwas verschlechtert
Nein, es hat sich sehr verschlechtert
5. Wann bzw. in welcher Situation haben Sie das Gefühl geblendet zu sein?

Kontrastsehvermögen

1. Haben Sie Probleme des Kontrastsehens (Erkennen von unterschiedlichen Helligkeitsstufen)?

nie selten manchmal oft immer

2. Wie stark fühlen Sie sich dadurch belastet?

überhaupt nicht ein wenig mäßig ziemlich sehr

3. War das schon vor der Operation so?

ja nein

4. Hat sich Ihr Kontrastsehvermögen nach der Operation im Vergleich zu vorher verbessert?

Ja, sehr viel

Ja, etwas

Nein, es ist gleichgeblieben

Nein, es hat sich etwas verschlechtert

Nein, es hat sich sehr verschlechtert

Allgemein

1. Sind Sie mit der Operation zufrieden?

Ja Nein

2. Wenn nein, warum?

3. Weitere Hinweise oder Anmerkungen Ihrerseits?

Herzlichen Dank für Ihre Mitarbeit

10. Thesen

1. Mit der wellenfrontgeführten und der konventionellen LASIK stehen zwei sichere Methoden zur operativen Korrektur der Myopie und der Myopie mit kombiniertem Astigmatismus zu Verfügung. Die Mehrheit der operierten Patienten liegt $\pm 0,5$ dpt SÄ um die Emmetropie.
2. Die wellenfrontgeführte LASIK unterscheidet sich von der konventionellen LASIK durch das erweiterte Ablationsprofil. Bei der konventionellen LASIK wird das Ablationsprofil nur durch die präoperativen Aberrationen der zweiten Ordnung bestimmt (sphäro-zylindrische Ablation). Bei der wellenfrontgeführten LASIK wird die Gesamtheit der präoperativ gemessenen Aberrationen, also auch die Aberrationen höherer Ordnung, in das Abtragungsprofil integriert.
3. Die postoperativen refraktiven Ergebnisse sind nach beiden Ablationsmethoden vergleichbar. In der Mehrzahl der Fälle kann postoperativ ein unkorrigierter Visus entsprechend dem präoperativ bestkorrigierten Visus oder besser erreicht werden. Ein supranormaler Visus ist die Ausnahme.
4. Der HO-RMS-Wert, als Repräsentant der Gesamtheit der höheren Aberrationen, steigt nach wellenfrontgeführter LASIK weniger stark an als nach konventioneller LASIK. Im Korrekturbereich bis $-5,0$ dpt SÄ ist die Wellenfront-LASIK in der Lage, den Wellenfrontfehler zu verringern, also präoperativ bestehende Aberrationen höherer Ordnung zu verkleinern. Bei hochmyopen Korrekturen entfällt dieser Vorteil aufgrund der durch die Ablation induzierten Aberrationen.
5. Das vertikale und horizontale Koma lassen sich durch die wellenfrontgeführte LASIK wirkungsvoll korrigieren sowohl im niedrigmyopen als auch im hochmyopen Korrekturbereich.

6. Die sphärischen Aberrationen profitieren ebenfalls von der wellenfrontgeführten LASIK, aber nur im Korrekturbereich bis -5,0 dpt SÄ. Nach der Korrektur von höheren Myopien überwiegt die ablationsbedingte Induktion sphärischer Aberrationen.
7. Im Bezug auf das postoperative Dämmerungssehen und die Blendungsempfindlichkeit zeigen beide Ablationsprofile vergleichbare Ergebnisse. Die Korrektur von Myopien $> -5,0$ dpt geht mit einer Verschlechterung des Dämmerungssehens und einer Zunahme der Blendungsempfindlichkeit einher.
8. Der Vorteil der wellenfrontgeführten LASIK liegt im Bereich des Kontrastsehens. Die Wellenfront-LASIK führt postoperativ zu Verbesserungen der Kontrastsensitivität im photopischen und mesopischen Bereich sowohl nach niedrigmyopen als auch nach hochmyopen Korrekturen. Die konventionelle LASIK hingegen führt zu Verschlechterungen des Kontrastsehens im photopischen und mesopischen Bereich.
9. Im Bezug auf die subjektive Sehqualität zeigen sich keine Unterschiede zwischen beiden Ablationsmethoden. Sowohl die wellenfrontgeführte als auch die konventionelle LASIK gehen mit einem sehr hohen Grad an Patientenzufriedenheit einher.
10. Perspektivisch ist eine bessere Anpassung der Untersuchungssituation an die Operationssituation wünschenswert. Weitere Untersuchungen sind notwendig, um die Vorteile der wellenfrontgeführten LASIK vollständig ausnutzen zu können. Besondere Berücksichtigung müssen hierbei die induzierten Aberrationen finden, vor allem im Bereich der höheren Korrekturen.

Lebenslauf

Persönliche Daten:

Name: Maria Heynemann
Geburtsdatum-/ort: 03.03.1980 in Halle/ Saale

Schulbildung:

1986 – 1988 Polytechnische Oberschule Fritz-Weineck, Halle/ Saale
1988 – 1990 Dr.-Kurt-Fischer-Oberschule Halle/ Saale
1990 – 1998 Johann-Gottfried-Herder-Gymnasium, Halle/ Saale
1999 Westminster College, London

Studium der Humanmedizin:

1999 – 2002 Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg
2002 – 2003 Università degli Studi di Milano, Mailand
2003 – 2006 Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg

Staatsexamina:

2001 Ärztliche Vorprüfung
2002 Erster Abschnitt der Ärztlichen Prüfung
2005 Zweiter Abschnitt der Ärztlichen Prüfung
2006 Dritter Abschnitt der Ärztliche Prüfung, Approbation

Praktisches Jahr (04/2005 – 03/2006):

1. Tertial Augenheilkunde: Universitätsaugenklinik, Halle/ Saale
2. Tertial Chirurgie: Ospedale Regionale di Lugano, Schweiz
3. Tertial Innere Medizin: Universitätsklinik der Justus-Liebig-Universität, Gießen

Facharztausbildung:

seit 1.10.2006 Assistenzärztin an der Klinik und Poliklinik für Augenheilkunde der Justus-Liebig-Universität Gießen

Gießen, Februar 2009

Maria Heynemann

Selbständigkeitserklärung

Ich erkläre, dass ich die der Medizinischen Fakultät der Martin-Luther-Universität Halle- Wittenberg zur Promotion eingereichte Dissertation mit dem Titel

Untersuchungen zu optischen Aberrationen, Dämmerungssehen, Blendungsempfindlichkeit und Kontrastsensitivität nach refraktiv-chirurgischen Lasereingriffen

ohne sonstige Hilfe durchgeführt habe und bei der Abfassung der Dissertation keine anderen als die dort aufgeführten Hilfsmittel benutzt habe.

Bei der Abfassung der Dissertation sind Rechte Dritter nicht verletzt worden.

Ich habe diese Dissertation bisher an keiner in- oder ausländischen Hochschule zur Promotion eingereicht. Ich übertrage der Medizinischen Fakultät das Recht, weitere Kopien meiner Dissertation herzustellen und zu vertreiben.

Gießen, Februar 2009

Maria Heynemann

Hinweis auf Publikationen und Vorträge

Publikationen:

Hammer T, Heynemann M, Naumann I, Duncker GIW: Korrektur und Induktion von Aberrationen höherer Ordnung nach Standard- und wellenfrontgeführter LASIK und deren Auswirkung auf das postoperative Kontrastsehen. Klinische Monatsblätter der Augenheilkunde 223 (2006) 217-224

Vorträge:

Hammer T, Heynemann M, Duncker GIW: Vergleich der Kontrastsensitivität und der Wellenfrontdeformation prä- und postoperativ nach Standard- und wellenfrontgeführter LASIK. Vortrag 22.9. 2006, Berlin, 104. Jahrestagung der Deutschen Ophthalmologischen Gesellschaft

Hammer T, Heynemann M, Naumann I, Duncker GIW: Vergleich der Korrektur und Induktion von Aberrationen höherer Ordnung nach Standard- und wellenfrontgeführter LASIK. Vortrag 26.9.2004, Berlin, 102. Jahrestagung der Deutschen Ophthalmologischen Gesellschaft

Danksagung

Herrn Prof. Dr. med. habil. G.I.W. Duncker danke ich herzlich für die Überlassung dieses Promotionsthemas und die Möglichkeit, in der von ihm geleiteten Klinik die Untersuchungen durchzuführen.

Mein persönlicher Dank gilt gleichermaßen Herrn PD Dr. med. habil. T. Hammer für die stets engagierte, kritische aber auch freundschaftliche Betreuung.

Mein besonderer Dank gilt meinen Eltern, die mit viel Geduld, aber auch der nötigen Konsequenz in ihren Empfehlungen mir den Weg gezeigt hat, um ans Ziel zu kommen.

Meinem Freund danke ich für die Geduld und Unterstützung während der Erstellung der Promotionsarbeit.

Herrn Prof. em. Dr. rer. nat. habil. Enke gilt mein Dank für die Hilfe bei der statistischen Auswertung der Daten.