

Aus der Klinik für Augenheilkunde  
Vivantes Klinikum Neukölln  
Direktor: Prof. Dr. med. Duy-Thoai Pham

**VERGLEICH DER KORNEALEN UND OKULÄREN ABERRATIONEN MITTELS  
KORNEALER TOPOGRAPHIE UND WELLENFRONT-ABERROMETRIE**

Inaugural-Dissertation  
zur Erlangung der  
medizinischen Doktorwürde  
der Charité – Universitätsmedizin Berlin  
Campus Benjamin Franklin

vorgelegt von  
Manuela Jahnke

aus Berlin

Referent: Prof. Dr. med. Duy-Thoai Pham

Koreferent: Prof. Dr. med. N.E. Bechrakis

Gedruckt mit Genehmigung der Charité – Universitätsmedizin Berlin  
Campus Benjamin Franklin

Promoviert am: 22. 09. 2006

*Meinen Eltern,  
Antonia und Clara  
gewidmet*

## INHALTSVERZEICHNIS

<b>1. EINLEITUNG .....</b>	<b>6</b>
1.1 HINTERGRUND .....	6
1.2 MATHEMATISCHE UND PHYSIKALISCHE GRUNDLAGEN .....	9
1.2.1 <i>Beschreibung optischer Aberrationen</i> .....	9
1.2.2 <i>Definitionen und Darstellungen der Wellenfront-Aberrationen</i> .....	10
1.2.3 <i>Berechnung der Zernike-Funktionen</i> .....	14
1.3 MEBVERFAHREN KORNEALER UND OKULÄRER ABERRATIONEN .....	17
1.4 FRAGESTELLUNG.....	20
<b>2. METHODEN .....</b>	<b>22</b>
2.1 VORUNTERSUCHUNGEN.....	22
2.1.1 <i>Untersuchungsstichprobe</i> .....	22
2.1.2 <i>Ein- bzw. Ausschlußkriterien</i> .....	22
2.1.3 <i>Untersuchungsvorbereitung</i> .....	23
2.2 ERMITTLUNG DER KORNEALEN UND OKULÄREN WELLENFRONT.....	24
2.2.1 <i>Ableitung der kornealen Aberrationen</i> .....	25
2.2.3 <i>Messung der okulären Wellenfront</i> .....	27
2.3 STATISTISCHE AUSWERTUNG .....	30
2.3.1 <i>Deskriptive Statistik</i> .....	31
2.3.2 <i>Reproduzierbarkeit</i> .....	32
2.3.3 <i>Anwendung der Korrelations- und Regressionsanalysen</i> .....	32
2.3.4 <i>Bland-Altman-Analyse und Differenzvergleich mittels T-Test</i> .....	33
<b>3. ERGEBNISSE .....</b>	<b>35</b>
3.1 EVALUIERUNG DER ERGEBNISSE MITTELS DESKRIPTIVER STATISTIK .....	35
3.1.1 <i>Demographische, refraktive und topographische Daten</i> .....	35
3.1.2 <i>Korneale und okuläre Aberrationen</i> .....	39
3.2 REPRODUZIERBARKEIT DER MEBERGEBNISSE.....	42
3.3 KORRELATIONSANALYSEN KORNEALER UND OKULÄRER ABERRATIONEN .....	43
3.4 BLAND-ALTMAN-ANALYSE UND DIFFERENZANALYSE .....	45
3.5 KORNEALE UND OKULÄRE ABERRATIONEN IN ABHÄNGIGKEIT VOM ALTER .....	49
3.5.1 <i>Altersabhängige Verteilung der kornealen und okulären Aberrationen</i> .....	49

3.5.2	<i>Vergleich der Korrelationen zwischen beiden Altersgruppen</i> .....	51
3.5.3	<i>Korneale und okuläre Differenzen zwischen beiden Altersgruppen</i> .....	53
3.6	ABERRATIONEN IN ABHÄNGIGKEIT VON AMETROPIE UND EMMETROPIE .....	54
3.6.1	<i>Refraktionsabhängiger Vergleich kornealer und okulärer Aberrationen</i> .....	54
3.6.2	<i>Vergleich der Korrelationen zwischen Myopie, Hyperopie, Emmetropie</i> .....	56
3.6.3	<i>Korneale und okuläre Differenzen zwischen Emmetropie und Ametropie</i> .....	57
3.7	KORRELATION ZWISCHEN RECHTEN UND LINKEN AUGEN.....	60
<b>4.</b>	<b>DISKUSSION</b> .....	<b>62</b>
4.1	KORNEALE UND OKULÄRE ABERRATIONEN.....	63
4.2	REPRODUZIERBARKEIT .....	66
4.3	KORRELATION KORNEALER UND OKULÄRER ABERRATIONEN .....	70
4.4	BEDEUTUNG DER KORNEAL-OKULÄREN DIFFERENZANALYSE .....	71
4.5	EINFLUß VON CHIRURGISCHEN EINGRIFFEN AUF DIE ABERRATIONEN .....	74
4.6	EINFLUß VON ALTER AUF DIE KORNEALEN UND OKULÄREN ABERRATIONEN .....	75
4.7	EINFLUß DER REFRAKTION .....	78
4.8	EINFLUß DER SYMMETRIE ZWISCHEN RECHTEM UND LINKEM AUGE .....	80
4.9	EINFLUß DER AKKOMMODATION.....	81
4.10	EINFLUß DES PUPILLENDURCHMESSERS .....	82
4.11	SCHLUßFOLGERUNGEN .....	84
<b>5.</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG</b> .....	<b>87</b>
<b>6.</b>	<b>LITERATURVERZEICHNIS</b> .....	<b>89</b>
<b>7.</b>	<b>ANHANG</b> .....	<b>103</b>
7.1	ABBILDUNGSVERZEICHNIS .....	103
7.2	TABELLENVERZEICHNIS .....	105
7.3	ABKÜRZUNGEN .....	106
7.4	BEZEICHNUNG DER ZERNIKE-KOEFFIZIENTEN/ RMS-WELLENFRONTFEHLER.....	108
	<b>CURRICULUM VITAE</b> .....	<b>109</b>
	<b>DANKSAGUNG</b> .....	<b>110</b>
	<b>ERKLÄRUNG</b> .....	<b>111</b>

## 7. ANHANG

### 7.1 Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Wellenfrontdarstellung für Defokus .....	11
Abb. 2: Wellenfrontdarstellung komplexer Aberrationen.....	11
Abb. 3: PSF Defokus - Myopie .....	12
Abb. 4: PSF Defokus und Astigmatismus.....	12
Abb. 5: PSF Koma Aberrationen .....	12
Abb. 6: PSF Sphärische Aberration.....	12
Abb. 7: Koma (vertikal) Aberrationen.....	13
Abb. 8: Sphärische Aberrationen.....	13
Abb. 9: Zernike-Pyramide.....	14
Abb. 10: Videokeratoskop mit Placidoaufnahme .....	25
Abb. 11: Ableitung der kornealen Wellenfront aus der Topographie .....	26
Abb. 12: Wellenfront-Aberrometer .....	27
Abb. 13: Meßprinzip nach Tscherning .....	28
Abb. 14: Beispiel Defokus - Myopie.....	29
Abb. 15: Beispiel Astigmatismus .....	29
Abb. 16: Häufigkeit für Visus s.c.....	36
Abb. 17: Häufigkeit für Visus c.c.....	36
Abb. 18: Zernike-Koeffizienten (korneal) .....	40
Abb. 19: Wellenfrontfehler (korneal).....	40
Abb. 20: Zernike-Koeffizienten (okulär) .....	41
Abb. 21: Wellenfrontfehler (okulär).....	41
Abb. 22: Korrelation für Koeffizient C04 .....	44
Abb. 23: Korrelation für Koeffizient C07 .....	44
Abb. 24: Korrelation für Koeffizient C08 .....	44
Abb. 25: Korrelation für Koeffizient C12 .....	44
Abb. 26: Bland-Altman-Diagramm für Koeffizient C07.....	47
Abb. 27: Bland-Altman Diagramm für Koeffizient C08.....	47
Abb. 28: Bland-Altman-Diagramm für Koeffizient C12.....	47
Abb. 29: Bland-Altman-Diagramm für Wellenfrontfehler (RMS 2).....	48
Abb. 30: Bland-Altman-Diagramm für Wellenfrontfehler (RMS 3).....	48

Abb. 31: Bland-Altman-Diagramm für Wellenfrontfehler (RMS 4).....	48
Abb. 32: Koeffizienten C03-C14 Alter < 45 Jahre (korneal).....	49
Abb. 33: Koeffizienten C03-C14 Alter ≥ 45 Jahre (korneal).....	49
Abb. 34: Koeffizienten C03-C14 Alter < 45 Jahre (okulär).....	49
Abb. 35: Koeffizienten C03-C14 Alter ≥ 45 Jahre (okulär).....	49
Abb. 36: Wellenfrontfehler (RMS 2-4) Alter < 45 Jahre (korneal).....	50
Abb. 37: Wellenfrontfehler (RMS 2-4) Alter ≥ 45 Jahre (korneal).....	50
Abb. 38: Wellenfrontfehler (RMS 2-4) Alter < 45 Jahre (okulär).....	50
Abb. 39: Wellenfrontfehler (RMS 2-4) Alter ≥ 45 Jahre (okulär).....	50
Abb. 40: Korrelation für Koeffizient C07 Alter < 45 Jahre (n = 76).....	52
Abb. 41: Korrelation für Koeffizient C07 Alter ≥ 45 Jahre (n = 22).....	52
Abb. 42: Korrelation für Koeffizient C08 Alter < 45 Jahre (n = 76).....	52
Abb. 43: Korrelation für Koeffizient C08 Alter ≥ 45 Jahre (n = 22).....	52
Abb. 44: Korrelation für Koeffizient C12 Alter < 45 Jahre (n = 76).....	52
Abb. 45: Korrelation für Koeffizient C12 Alter ≥ 45 Jahre (n = 22).....	52
Abb. 46: Koeffizienten C03-C14 Emmetropie (korneal).....	55
Abb. 47: Koeffizienten C03-C14 Emmetropie (okulär).....	55
Abb. 48: Koeffizienten C03-C14 Myopie (korneal).....	55
Abb. 49: Koeffizienten C03-C14 Myopie (okulär).....	55
Abb. 50: Koeffizienten C03-C14 Hyperopie (korneal).....	55
Abb. 51: Koeffizienten C03-C14 Hyperopie (okulär).....	55
Abb. 52: Korrelation für Koeffizient C12 Emmetropie (n = 49).....	57
Abb. 53: Korrelation für Koeffizient C12 Myopie (n = 41).....	57

## 7.2 Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Technische Spezifikationen .....	24
Tab. 2: Zusammenfassung der Untersuchungsparameter .....	31
Tab. 3: Demographische Daten .....	35
Tab. 4: Refraktive Daten .....	37
Tab. 5: Verteilung des Astigmatismus .....	37
Tab. 6: Topographische Daten .....	38
Tab. 7: Korneale Zernike-Koeffizienten und Wellenfrontfehler .....	39
Tab. 8: Okuläre Zernike-Koeffizienten und Wellenfrontfehler .....	40
Tab. 9: Reproduzierbarkeit - mittlere Variationskoeffizienten .....	42
Tab. 10: Korrelation zwischen kornealen und okulären Aberrationen .....	43
Tab. 11: Darstellung der Parameter für die Bland-Altman-Diagramme .....	46
Tab. 12: Vergleich der korneal-okulären Korrelation beider Altersgruppen .....	51
Tab. 13: Vergleich der kornealen und okulären Aberrationen beider Altersgruppen mittels Mann-Whitney-U-Test für unabhängige Stichproben .....	53
Tab. 14: Vergleich der Korrelation aller Fehlsichtigkeitsgruppen .....	56
Tab. 15: Vergleich der Aberrationen zwischen Emmetropie, Myopie und Hyperopie mittels T-Test für unabhängige Stichproben .....	58
Tab. 16: Korrelation kornealer Polynome zwischen rechtem und linkem Auge .....	60
Tab. 17: Korrelation okulärer Polynome zwischen rechtem und linkem Auge .....	61



### 7.3 Abkürzungen

Abb	Abbildung
AT	Augentropfen
$c_{nm}$	Zernike-Koeffizient
CCD	charged coupled device
D	Dioptrie
Em	Emmetropie
Grd	Grad
HH	Hornhaut
Hy	Hyperopie
IOL	Intraokularlinse
IQR	Interquartilsbereich
LA	Linkes Auge
LASIK	Laser-assistierte in situ Keratomileusis
LSF	line spread function
m	meridional frequency, Winkelfrequenz
MAX	Maximum
MIN	Minimum
mm	Millimeter
$\mu\text{m}$	Mikrometer
MTF	modulation transfer function
MW	Mittelwert
MWU	Mann-Whitney-U-Test
My	Myopie
n	order („aus dem englischen“ für Ordnung) , radiale Ordnung
nm	Nanometer
OTF	optical transfer function
p	propability („aus dem englischen“ für Wahrscheinlichkeit)
PSF	point spread function
PTF	phase transfer function

r	Radius
r	auch Korrelationskoeffizient (Pearson/Spearman)
RA	Rechtes Auge
RMS	root mean square, Wellenfrontvarianz
SÄ	Sphärisches Äquivalent
SD	standarddeviation („aus dem englischen“ für Standardabweichung)
SE	spherical equivalent („aus dem englischen“ für sphärisches Äquivalent)
Sph	Sphäre
Tab	Tabelle
vs	versus
W	Wellenfront
$\Delta W$	Wellenfrontdeformation
$Z_{nm}$	Zernike-Funktion, n-ter Ordnung und Winkelfrequenz m
Zyl	Zylinder

## 7.4 Bezeichnung der Zernike-Koeffizienten/ RMS-Wellenfrontfehler

KOEFFIZIENT C (Index j)	ORDNUNG n	FREQUENZ m	POLYNOM $Z_n^m(p, \theta)$	BEZEICHNUNG
C00	0.Ordnung	0	$Z_0^0$	Kolben/Piston
C01	1.Ordnung	-1	$Z_1^{-1}$	Kippung/Tilt y
C02		1	$Z_1^{+1}$	Prisma/Tilt x
C03	2.Ordnung	-2	$Z_2^{-2}$	Astigmatismus 45°
C04		0	$Z_2^0$	Defokus/ Sphäre
C05		2	$Z_2^{+2}$	Astigmatismus 0/90°
C06	3.Ordnung	-3	$Z_3^{-3}$	Dreiblatt/ Trefoil
C07		-1	$Z_3^{-1}$	Coma x horizontal
C08		1	$Z_3^{+1}$	Coma y vertikal
C09		3	$Z_3^{+3}$	Dreiblatt/Trefoil
C10	4.Ordnung	-4	$Z_4^{-4}$	Vierblatt/ Quatrefoil
C11		-2	$Z_4^{-2}$	sekundärer Astigmatismus
C12		0	$Z_4^0$	sphärische Aberrationen
C13		2	$Z_4^{+2}$	sekundärer Astigmatismus
C14		4	$Z_4^{+4}$	Vierblatt/Quatrefoil

### RMS-WELLENFRONTFEHLER

RMS 2	2. Ordnung	niedrige Ordnung
RMS 3	3. Ordnung	höhere Ordnung
RMS 4	4. Ordnung	höhere Ordnung

## **Danksagung**

An dieser Stelle möchte ich Herrn Professor Dr. med. Duy -Thoai Pham, Direktor der Klinik für Augenheilkunde, Vivantes Klinikum Neukölln-Berlin für die Überlassung des Promotionsthemas herzlich danken.

Meinem Mentor und Betreuer Herrn Dr. med. Christopher Wirbelauer, Oberarzt der Klinik für Augenheilkunde, Vivantes Klinikum Neukölln-Berlin danke ich besonders für die wertvollen Anregungen, Literaturempfehlungen und wissenschaftlichen Rat sowie die mir gewährte Unterstützung zu jeder Zeit.

Herrn Volker Happ und Herrn Dipl. Ing. Marc Dierolf der Firma Schwind, Kleinostheim, danke ich ebenfalls für die kompetente Beratung, Installation von Software und Einsicht in Schulungsunterlagen in der Anfangsphase meiner Arbeit.

Schließlich möchte ich mich bei meinen Eltern, Freunden und Kollegen bedanken, die mir mit geistiger Anregung und moralischer Unterstützung stets zur Seite standen. Insbesondere meinen Töchtern Antonia und Clara danke ich für ihren täglichen Ansporn, Verständnis und Geduld.

## **Erklärung**

„Ich, Manuela Jahnke, erkläre, daß ich die vorgelegte Dissertationsschrift mit dem Thema: „Vergleich der kornealen und okulären Aberrationen mittels kornealer Topographie und Wellenfront-Aberrometrie“ selbst verfaßt und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt, ohne die (unzulässige) Hilfe Dritter verfaßt und auch in Teilen keine Kopien anderer Arbeiten dargestellt habe.“

Berlin, den 19. 10. 2005