

3. ERGEBNISSE

3.1 Evaluierung der Ergebnisse mittels deskriptiver Statistik

3.1.1 Demographische, refraktive und topographische Daten

Von 49 Probanden wurden 98 gesunde Augen untersucht.

Bei zwei Probanden wurde eine leichte Endotheldystrophie im Sinne einer Cornea guttata diagnostiziert.

An der Studie beteiligten sich 26 Frauen und 23 Männer.

Die Unterteilung der Untersuchungsgruppe mit der Altersgrenze kleiner 45 Jahre ergab, daß 78% der Probanden in diese Kategorie fielen (Tabelle 3).

Tab. 3: Demographische Daten

Demographische Daten		N	Prozent	MW	SD	MIN	MAX
Probanden							
Geschlecht	Männlich	23	46,9				
	Weiblich	26	53,1				
Alter (Jahre)	Gesamt	49	100	38,61	10,04	17	65
	< 45 Jahre	38	77,6	34,63	6,75	17	44
	≥ 45 Jahre	11	22,4	52,36	6,87	45	65
Augen							
Visus s.c. (Dezimal)	Unkorrigiert	98	100	0,80	0,44	0,03	1,60
Visus c.c. (Dezimal)	Bestkorrigiert	98	100	1,25	0,09	0,50	1,60
Emmetropie (D)	SE ≤ ± 0,5	49	50	0,02	0,26	-0,50	+0,50
Myopie (D)	SE < - 0,5	41	41,8	-2,22	1,60	-6,75	-0,63
Hyperopie (D)	SE > + 0,5	8	8,2	+1,70	1,33	+0,63	+3,88
Pupillenweite (mm)	Physiologisch	98	100	3,5	0,42	2,5	4,8
	Dilatiert	98	100	7,0	0,41	6,5	8,5

Die Probandengruppe setzte sich etwa zu gleichen Teilen aus Normalsichtigen und Fehlsichtigen, überwiegend Myopen, zusammen.

Das mittlere sphärische Äquivalent (SE) betrug $-0,78\text{ D}$ ($\text{SD} \pm 1,64\text{ D}$).

Der durchschnittliche unkorrigierte Visus (s.c.) betrug $0,8 \pm 0,44$ (0,03 bis 1,6) und bestkorrigiert (c.c.) $1,25 \pm 0,09$ (0,8 bis 1,6) mit einer Ausnahme im Falle einer Amblyopie mit einem Visus von 0,5. Ein bestmöglicher Visus von 1,6 wurde sowohl ohne als auch mit Korrektur mehrfach erreicht (Tabelle 3 und Abb. 16 und 17).

Abb. 16: Häufigkeit für Visus s.c.

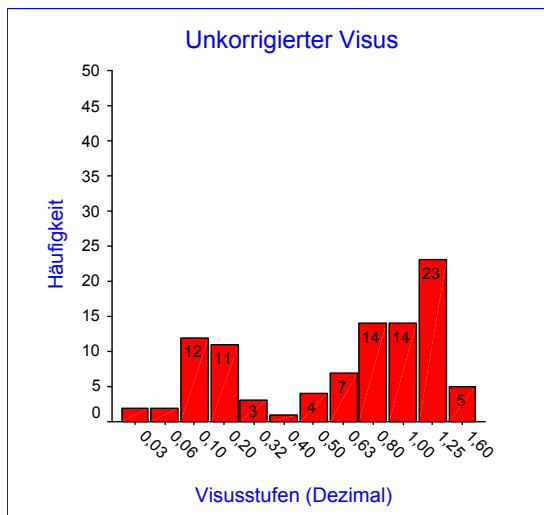
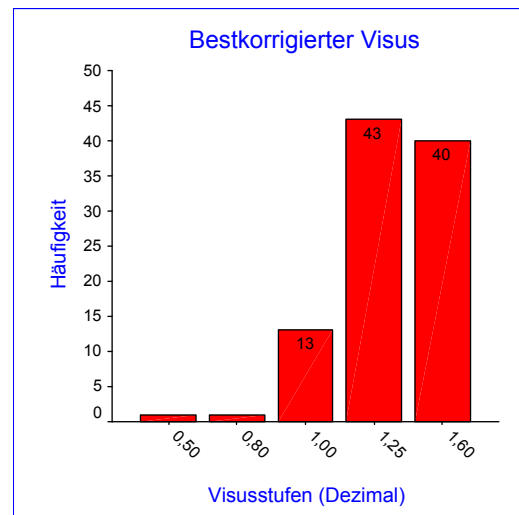


Abb. 17: Häufigkeit für Visus c.c.



Hinsichtlich der Refraktion unterschieden sich die Werte der subjektiven, automatischen und okulären Refraktion nur geringfügig voneinander ($p > 0,05$; Mann-Whitney-U-Test). Die Differenz der sphärischen und zylindrischen Werte aller Refraktionen lag im Mittel innerhalb 0,25 Dioptrien. Die okulären Messungen ergaben im Mittel die größten Werte (Tabelle 4).

Tab. 4: Refraktive Daten

Refraktive Daten		MW	SD	MIN	MAX
Subjektive Refraktion	Sphäre (D)	-0,58	1,70	-6,75	4,00
	Zylinder (D)	-0,40	0,37	-1,75	0,00
	SE (D)	-0,78	1,71	-6,75	3,88
Automatische Refraktion	Sphäre (D)	-0,55	1,82	-6,75	4,50
	Zylinder (D)	-0,51	0,42	-2,00	0,00
	SE (D)	-0,80	1,81	-7,00	4,00
Okuläre Refraktion	Sphäre (D)	-0,62	1,68	-6,42	3,77
	Zylinder (D)	-0,53	0,41	-2,11	-0,05
	SE (D)	-0,89	1,69	-6,68	3,63

Die Achse des Astigmatismus der verschiedenen Refraktionen wurde entsprechend den 3 verschiedenen Kategorien - Astigmatismus mit oder gegen die Regel bzw. schrägen Astigmatismus - zugeordnet (Tabelle 5).

Tab. 5: Verteilung des Astigmatismus

	Achsenverteilung des Astigmatismus							
	Refraktion							
	subjektiv		automatisch		okulär		topographisch	
	N	Prozent	N	Prozent	N	Prozent	N	Prozent
Astigmatismus mit der Regel (0-29°; 150-179°)	62	63,3	57	58,2	45	45,9	86	87,8
Astigmatismus obliquus (30-59°; 120-149°)	5	5,1	11	11,2	12	12,2	9	9,2
Astigmatismus gegen die Regel (60-119°)	31	31,6	30	30,6	41	41,8	3	3,1

Während topographisch der Astigmatismus mit der Regel dominierte, stellte sich subjektiv, automatisch und okulär ein Gleichgewicht zwischen den Astigmatismen mit und gegen die Regel heraus.

Ein lentogener Astigmatismus mit einer korneal-okulären Differenz von mehr als einer Dioptrie (1,01 D bis 1,35 D) lag bei 7 Probanden (14,3%) in 8 Augen (8,2%) vor. Zwei dieser Probanden waren älter als 45 Jahre. Dabei änderte sich bei 2 Augen von zwei verschiedenen Probanden die Achsenlage vom Astigmatismus mit der Regel zum Astigmatismus gegen die Regel (4° zu 117°) bzw. vom Astigmatismus mit der Regel zum schrägen Astigmatismus (3° zu 51°). Die Differenz betrug hierbei 1,35 Dioptrien bzw. 1,27 Dioptrien. Außerdem fiel ein Proband bei einem Auge okulär mit einem *höheren* Astigmatismus als topographisch-korneal auf. Die Differenz betrug bei konstanter Achsenlage 1,16 Dioptrien.

Auf der Basis der Topographie-Messungen wurde eine durchschnittliche korneale Brechkraft von 42,63 Dioptrien mit einem mittleren kornealen Astigmatismus von 0,86 Dioptrien festgestellt. Die Einteilung der topographischen Karten ergab in 78% der Fälle eine reguläre bzw. symmetrische Kornea. Eine leichte Asymmetrie bestand bei 22% der Probanden. Irreguläre Hornhautoberflächen wurden ausgeschlossen (Tabelle 6).

Tab. 6: Topographische Daten

Topographische Daten	N	Prozent	MW	SD	MIN	MAX
Topographisch-korneale Brechkraft (D)	98	100	42,63	1,40	38,87	45,23
Topographisch-kornealer Astigmatismus (D)	98	100	0,86	0,53	0,13	2,75
Topographische Klassifikation						
1 Homogenität	63	64,3				
2 Symmetrie	13	13,3				
3 Asymmetrie kraniale Hemisphäre	12	12,2				
4 Asymmetrie kaudale Hemisphäre	10	10,2				
5 Irregularität	0	0				

3.1.2 Korneale und okuläre Aberrationen

Die einzelnen kornealen und okulären Zernike-Koeffizienten, sowie RMS-Wellenfrontfehler wurden in den Tabellen 7 und 8 zusammengefaßt.

Dabei hoben sich korneal die Aberrationen C04 (Defokus) mit 0,603 µm und C12 (sphärische Aberration) mit 0,189 µm ab (Abb. 18 und 19). Okulär ebenfalls auffallend waren Defokus mit 0,720 µm und Astigmatismus C05 mit -0,126 µm (Abb. 20 und 21).

Für alle anderen Polynome betragen die mittleren Koeffizienten weniger als 0,1 µm. Zum Teil zeigten sich große Standardabweichungen für die Aberrationen der 2. und 3. Ordnung, besonders bei Koma C07/C08 (Tabelle 7 und 8, Abb. 18 und 20).

Mit steigender Ordnung nahmen die kornealen und okulären RMS-Wellenfrontfehler ab (Tabelle 7 und 8, Abb. 19 und 21).

Tab. 7: Korneale Zernike-Koeffizienten und Wellenfrontfehler

Aberration					
Korneal	Polynom	Mittelwert	SD	Minimum	Maximum
C03	Astigmatismus 45°	-0,003	0,182	-0,683	0,486
C04	Defokus	0,603	1,335	-3,309	5,058
C05	Astigmatismus 0°/90°	-0,047	0,394	-1,329	1,031
C06	Dreiblatt	-0,071	0,126	-0,323	0,290
C07	Koma horizontal	-0,025	0,225	-0,987	0,582
C08	Koma vertikal	0,004	0,285	-0,661	0,735
C09	Dreiblatt	0,018	0,128	-0,276	0,383
C10	Vierblatt	0,006	0,047	-0,104	0,172
C11	Sekundärer Astigmatismus	0,006	0,043	-0,082	0,235
C12	Sphärische Aberration	0,189	0,061	0,013	0,294
C13	Sekundärer Astigmatismus	-0,011	0,062	-0,154	0,128
C14	Vierblatt	0,024	0,054	-0,081	0,154
RMS2	2.Ordnung	0,781	0,838	0,000	3,843
RMS3	3.Ordnung	0,226	0,096	0,048	0,644
RMS4	4.Ordnung	0,142	0,039	0,058	0,210

Abb. 18: Zernike-Koeffizienten (korneal)

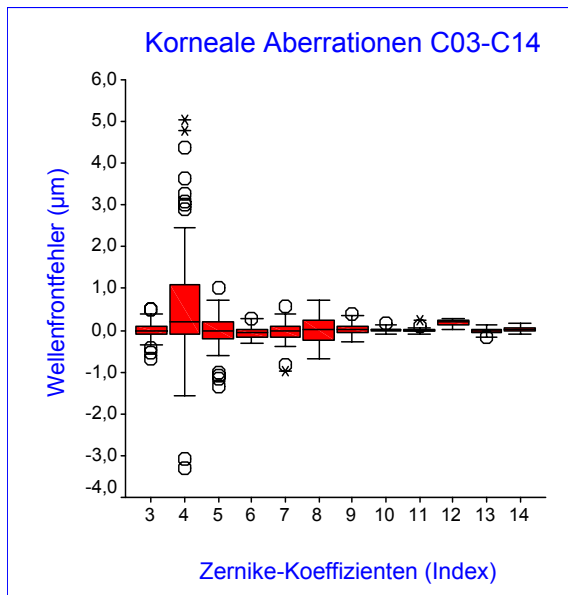
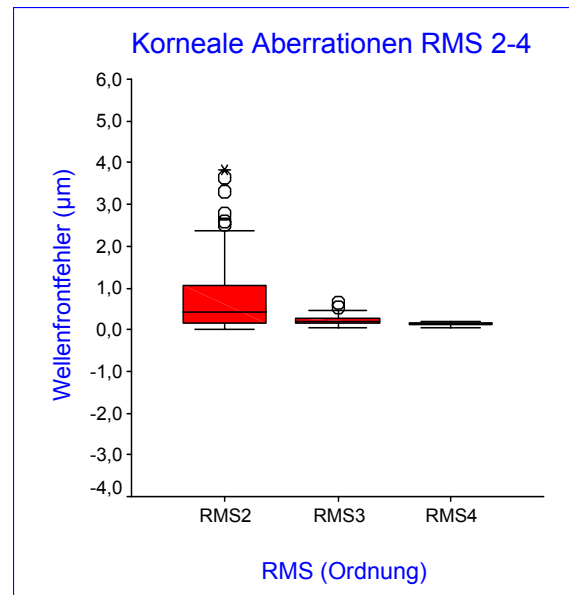


Abb. 19: Wellenfrontfehler (korneal)



Tab. 8: Okuläre Zernike-Koeffizienten und Wellenfrontfehler

Aberration					
Okulär	Polynom	Mittelwert	SD	Minimum	Maximum
C03	Astigmatismus 45°	-0,004	0,231	-0,942	0,444
C04	Defokus	0,720	1,372	-2,946	5,431
C05	Astigmatismus 0/90°	-0,126	0,477	-1,515	1,662
C06	Dreiblatt	-0,100	0,132	-0,409	0,293
C07	Koma horizontal	-0,055	0,183	-0,784	0,350
C08	Koma vertikal	-0,003	0,121	-0,305	0,333
C09	Dreiblatt	-0,022	0,108	-0,340	0,255
C10	Vierblatt	0,005	0,052	-0,098	0,113
C11	Sekundärer Astigmatismus	0,000	0,038	-0,085	0,088
C12	Sphärische Aberration	0,089	0,077	-0,058	0,268
C13	Sekundärer Astigmatismus	0,002	0,050	-0,130	0,133
C14	Vierblatt	0,013	0,054	-0,090	0,212
RMS2	2.Ordnung	0,876	0,858	0,053	4,135
RMS3	3.Ordnung	0,164	0,079	0,032	0,473
RMS4	4.Ordnung	0,091	0,040	0,023	0,216

Abb. 20: Zernike-Koeffizienten (okulär)

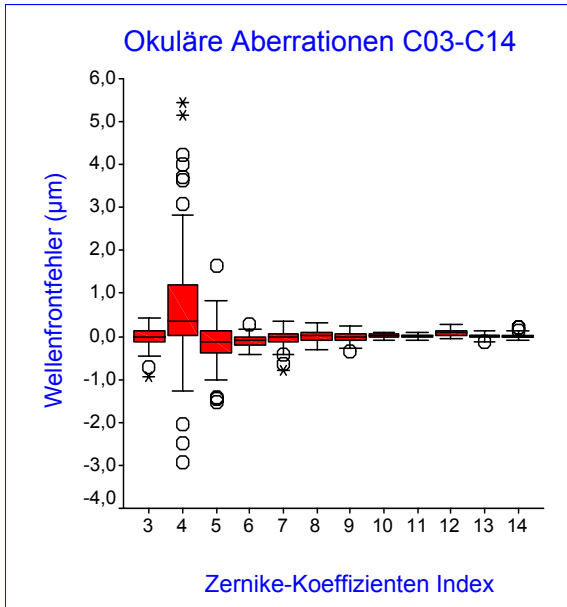
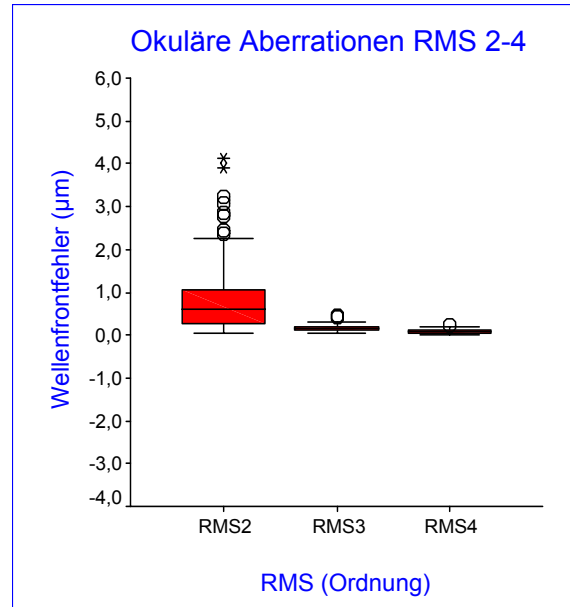


Abb. 21: Wellenfrontfehler (okulär)



3.2 Reproduzierbarkeit der Meßergebnisse

Die Reproduzierbarkeit wurde für alle bestimmten Koeffizienten ausgewertet. Da die kornealen Aberrationen nicht auf realen, sondern rechnerisch erzeugten Wellenfronten basierten, wurden die Zernike-Koeffizienten der 2. Ordnung, die aus der Eingabe der subjektiven Refraktionswerte resultierten, ausgeschlossen. Aus Tabelle 9 wird die Abhängigkeit der durchschnittlichen Variationskoeffizienten vom Zernike-Polynom ersichtlich. Die besten Reproduzierbarkeitswerte für die Aberrationen der höheren Ordnung fanden sich korneal und okulär für die Polynome Koma horizontal C07 und vertikal C08 sowie sphärische Aberration C12 (Tabelle 8). Bei Betrachtung aller Variationskoeffizienten auf Basis des Medians wurde eine polynomabhängige gute (korneal C12 mit 5,1%) bis gerade noch akzeptable (okulär C11 mit 51,5%) Reproduzierbarkeit festgestellt. Insgesamt wiesen die kornealen Aberrationen im Vergleich zu den okulären Aberrationen eine tendenziell geringere Schwankungsbreite auf (Tabelle 9).

Tab. 9: Reproduzierbarkeit - mittlere Variationskoeffizienten

Aberration	SD/MW %	SD/Median %	Aberration	SD/MW %	SD/Median %
Korneal			Okulär		
C03			C03	159,2%	20,9%
C04			C04	48,5%	5,9%
C05			C05	748,7%	11,3%
C06	41,3%	17,0%	C06	76,9%	21,4%
C07	52,4%	11,9%	C07	54,6%	21,8%
C08	10,4%	5,7%	C08	125,9%	24,0%
C09	88,8%	21,8%	C09	127,3%	28,3%
C10	1121,1%	48,6%	C10	355,5%	39,2%
C11	191,4%	29,0%	C11	188,3%	51,5%
C12	8,0%	5,1%	C12	198,3%	12,8%
C13	96,9%	24,1%	C13	177,2%	42,5%
C14	224,6%	44,5%	C14	198,6%	49,4%

3.3 Korrelationsanalysen kornealer und okulärer Aberrationen

Allgemein fanden sich zwischen den kornealen und okulären Aberrationen signifikante Korrelationen, insbesondere für die Zernike-Koeffizienten C04 (Defokus) mit $r = 0,98$, C05 (Astigmatismus) mit $r = 0,88$ und C09 (Dreiblatt) mit einem Koeffizienten von $r = 0,82$.

Schwächere Korrelationen zeigten sich dagegen bei den sphärischen Aberrationen C12 mit einem Korrelationskoeffizienten von $r = 0,31$.

Die RMS-Wellenfrontfehler spiegelten die Abnahme der Korrelationen mit steigender Ordnung wider (Tabelle 10).

Tab. 10: Korrelation zwischen kornealen und okulären Aberrationen

Aberration	Polynom	Pearson r	Signifikanz p < 0,05	Spearman r	Signifikanz p < 0,05
C03	Astigmatismus 45°	0,63	<0,0001	0,64	<0,0001
C04	Defokus	0,98	<0,0001	0,92	<0,0001
C05	Astigmatismus 0/90°	0,88	<0,0001	0,80	<0,0001
C06	Dreiblatt	0,75	<0,0001	0,72	<0,0001
C07	Koma horizontal	0,78	<0,0001	0,70	<0,0001
C08	Koma vertikal	0,60	<0,0001	0,56	<0,0001
C09	Dreiblatt	0,82	<0,0001	0,74	<0,0001
C10	Vierblatt	0,68	<0,0001	0,67	<0,0001
C11	Sekundärer Astigmatismus	0,70	<0,0001	0,71	<0,0001
C12	Sphärische Aberration	0,31	0,002	0,36	<0,0001
C13	Sekundärer Astigmatismus	0,61	<0,0001	0,61	<0,0001
C14	Vierblatt	0,37	<0,0001	0,35	<0,0001
RMS2	2.Ordnung	0,97	<0,0001	0,85	<0,0001
RMS3	3.Ordnung	0,61	<0,0001	0,53	<0,0001
RMS4	4.Ordnung	0,31	0,002	0,37	<0,0001

Das unterschiedliche Ausmaß und die Abnahme der Korrelation mit ansteigendem Koeffizienten-Index wurden an den Beispielen für Defokus, horizontale und vertikale Koma, sowie für die sphärische Aberration besonders deutlich (Abb. 22 bis 25).

Abb. 22: Korrelation für Koeffizient C04

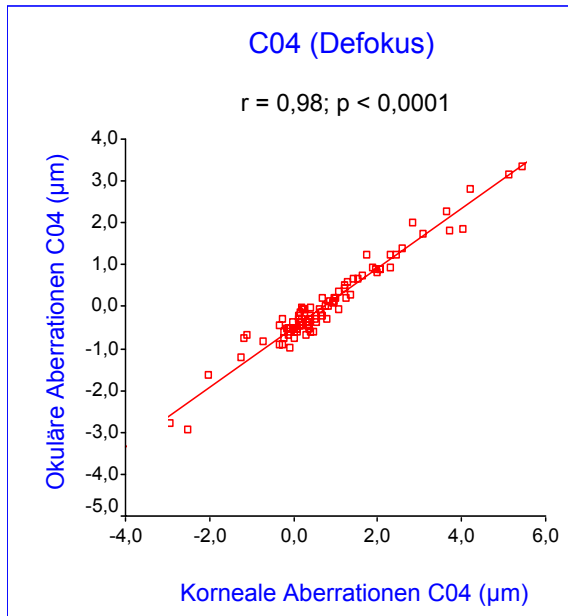


Abb. 23: Korrelation für Koeffizient C07

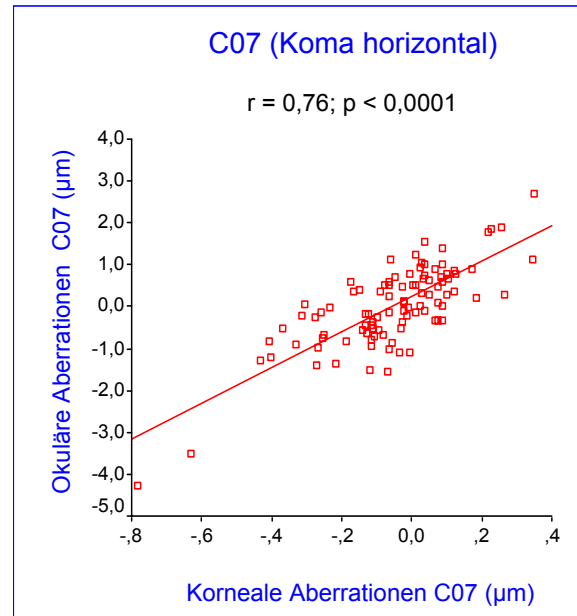


Abb. 24: Korrelation für Koeffizient C08

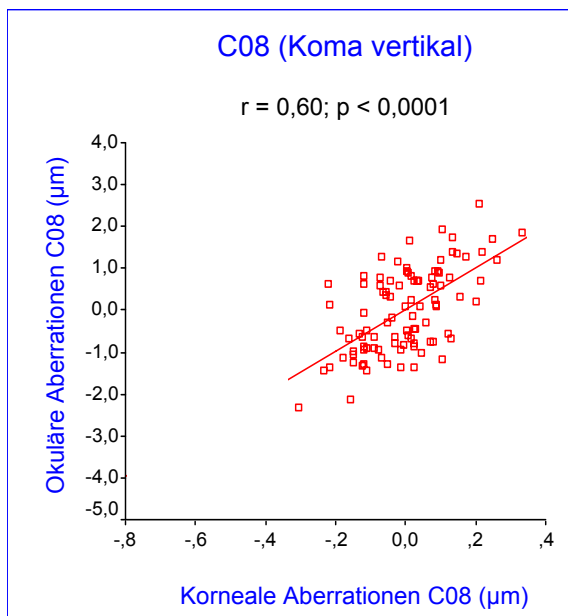
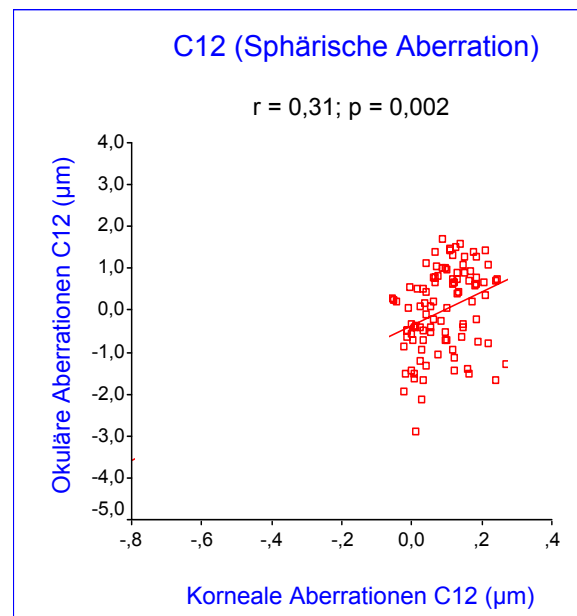


Abb. 25: Korrelation für Koeffizient C12



3.4 Bland-Altman-Analyse und Differenzanalyse

Die Übereinstimmung der kornealen und okulären Meßergebnisse mittels Bland-Altman- und Differenzanalyse wurde in Tabelle 11 zusammengefaßt.

Beim Vergleich der absoluten Werte der mittleren kornealen und okulären Zernike-Koeffizienten C03 bis C14 stellten sich die kornealen Zernike-Koeffizienten ab der 4. Ordnung (Polynom C10) ähnlich gleich oder größer als die okulären Aberrationen dar. Weiterhin überwogen mit ansteigendem Index der Koeffizienten, d.h. mit zunehmender Ordnung, die positiven Aberrationen - korneal innerhalb der 3., okulär ab der 4. Ordnung.

Die Differenzanalyse mittels T-Test zwischen kornealen und okulären Wellenfrontfehlern, bezogen auf die einzelnen Zernike-Polynome, bestätigte signifikante Unterschiede für Defokus C04, Astigmatismus $0^\circ/90^\circ$ C05, Dreiblatt C06/09 sowie für sphärische Aberrationen C12. Die höchsten absoluten Differenzbeträge wurden für Defokus und sphärische Aberrationen C12 um $0,1 \mu\text{m}$ ermittelt. Während die meisten Differenzen positiv ausfielen, wurden für Defokus C04 mit $-0,117 \mu\text{m}$ und sekundären Astigmatismus C13 mit $-0,013 \mu\text{m}$ negative Differenzwerte bestimmt.

Im Gegensatz zu den genannten Aberrationen unterschieden sich Astigmatismus 45° (C03), vertikale Koma (C08) und Vierblatt (C10) mit den geringsten Differenzen korneal und okulär nicht signifikant voneinander (Tabelle 11).

Analog wies der T-Test für die RMS-Wellenfrontfehler der 2. bis 4. Ordnung ebenfalls signifikante Unterschiede nach. Während der RMS-Wellenfrontfehler der 2. Ordnung okulär mit $0,876 \mu\text{m}$ noch größer als korneal mit $0,781 \mu\text{m}$ war, sanken die Wellenfrontfehler mit zunehmender Ordnung und sich verringernden Differenzen auf unter $0,2 \mu\text{m}$. Die kornealen Aberrationen dominierten dabei gegenüber den okulären Aberrationen (Tabelle 11).

Tab. 11: Darstellung der Parameter für die Bland-Altman-Diagramme*

n = 98	MW	MW	MW (Polynom)	MW (Differenz)	SD	-1.96SD	+1.96SD	T-Test
Polynom	Korneal	Okulär	(Korneal+Okulär)/2	(Korneal-Okulär)	Differenz	Grenzen der Übereinstimmung		(2-seitig)
								p'< 0,004
C03	-0,003	-0,004	-0,004	0,001	0,182	-0,356	0,358	0,960
C04	0,603	0,720	0,661	-0,117	0,306	-0,717	0,483	0,000
C05	-0,047	-0,126	-0,086	0,080	0,230	-0,371	0,530	0,001
C06	-0,071	-0,100	-0,085	0,028	0,091	-0,150	0,207	0,003
C07	-0,025	-0,055	-0,040	0,030	0,142	-0,248	0,307	0,041
C08	0,004	-0,003	0,000	0,006	0,232	-0,449	0,461	0,788
C09	0,018	-0,022	-0,002	0,040	0,074	-0,104	0,185	0,000
C10	0,006	0,005	0,006	0,002	0,039	-0,076	0,079	0,706
C11	0,006	0,000	0,003	0,005	0,031	-0,056	0,067	0,098
C12	0,189	0,089	0,139	0,100	0,082	-0,060	0,261	0,000
C13	-0,011	0,002	-0,004	-0,013	0,050	-0,112	0,085	0,010
C14	0,024	0,013	0,018	0,011	0,061	-0,108	0,130	0,087
RMS2	0,781	0,876	0,829	-0,095	0,210	-0,506	0,316	0,000
RMS3	0,226	0,164	0,195	0,062	0,079	-0,092	0,216	0,000
RMS4	0,142	0,091	0,116	0,051	0,046	-0,039	0,142	0,000

* Erläuterung der Parameter bezüglich der verschiedenen Mittelwerte/Standardabweichungen und Differenzbildung siehe Kapitel 2.3.4; S.33-34

Bezüglich der Grenzen der Übereinstimmung wurde für die Zernike-Koeffizienten niedrigerer Ordnung - C03 (Astigmatismus 45°) und C05 (Astigmatismus 0/90°) - sowie der zugehörigen RMS-Wellenfrontfehler (RMS2) Übereinstimmung festgestellt. Für C04 (Defokus) lagen die Werte außerhalb der definierten Grenzen von $\pm 0,5 \mu\text{m}$ (Tabelle 11).

Auch für die Aberrationen der höheren Ordnung konnte nicht für alle Polynome Übereinstimmung von kornealen und okulären Aberrationen verzeichnet werden. Der Grenzbereich von $\pm 0,2 \mu\text{m}$ wurde von C07/08 (Koma) mit einer großen Streuung der Werte überschritten. Insbesondere für C08 lagen bei einem Mittelwert von $0,006 \mu\text{m}$ die Paardifferenzen zwischen $0,461 \mu\text{m}$ und $-0,449 \mu\text{m}$, d.h. weit außerhalb der Grenzen der Übereinstimmung (Tabelle 11, Abb. 26 und 27). Ebenfalls keine Übereinstimmung wurde für C12 (sphärische Aberration) nachgewiesen (Tabelle 11, Abb. 28). Die RMS-Wellenfrontfehler der höheren Ordnungen befanden sich jedoch innerhalb der vorgegebenen Grenzen (Tabelle 11, Abb. 29 bis 31).

In den Abbildungen 26 bis 28 wurden die Koeffizienten C07, C08 und C12 exemplarisch nach der Bland-Altman-Methode graphisch dargestellt.

Abb. 26: Bland-Altman-Diagramm für Koeffizient C07 (Koma horizontal)

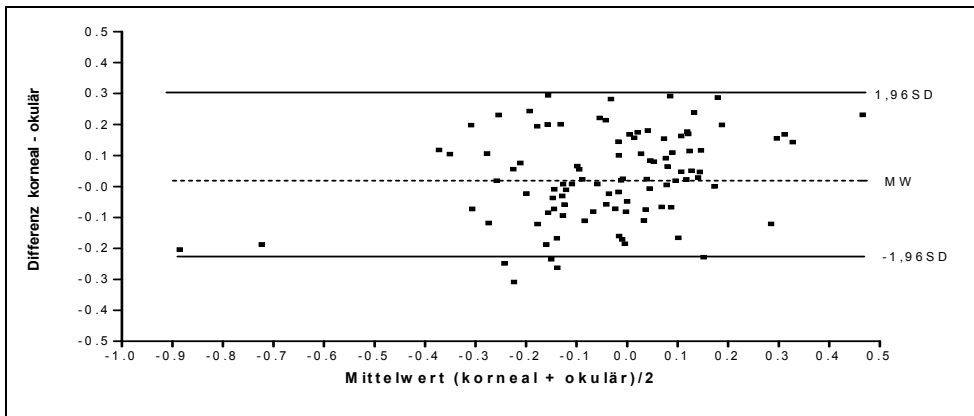


Abb. 27: Bland-Altman-Diagramm für Koeffizient C08 (Koma vertikal)

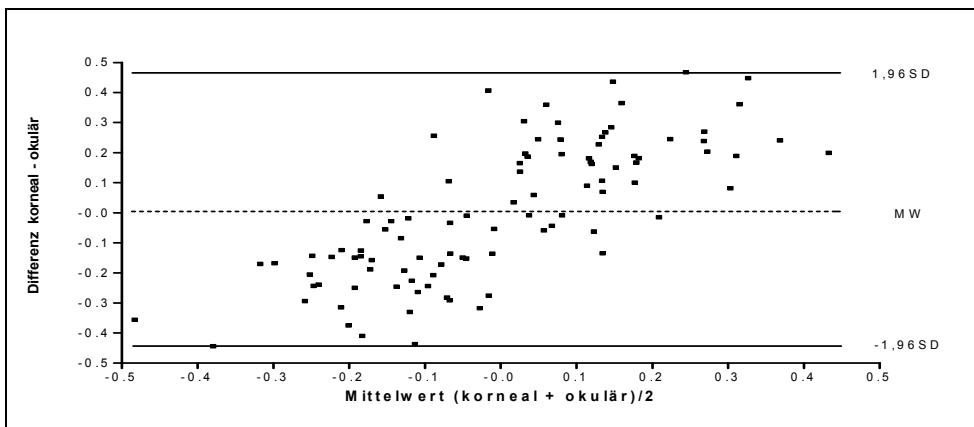
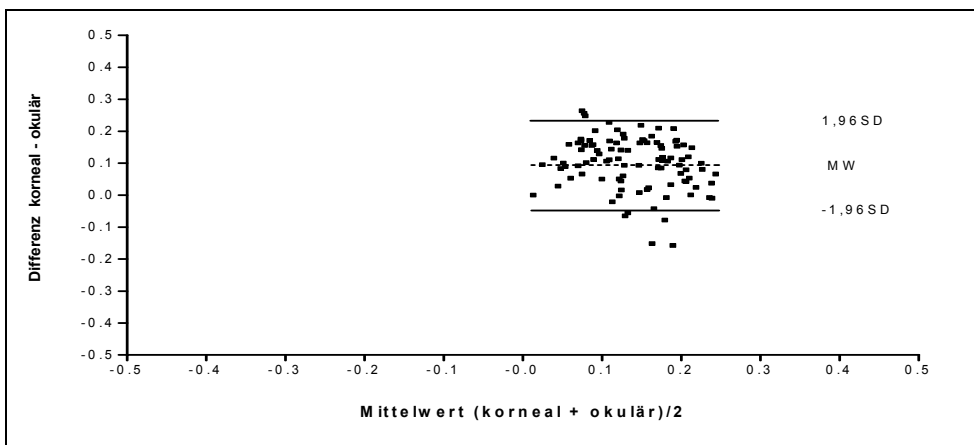


Abb. 28: Bland-Altman-Diagramm für Koeffizient C12 (sphärische Aberration)



Analog erfolgte die Darstellung der RMS-Wellenfrontfehler der 2. bis 4. Ordnung in den Abbildungen 29 bis 31.

Abb. 29: Bland-Altman-Diagramm für Wellenfrontfehler (RMS 2)

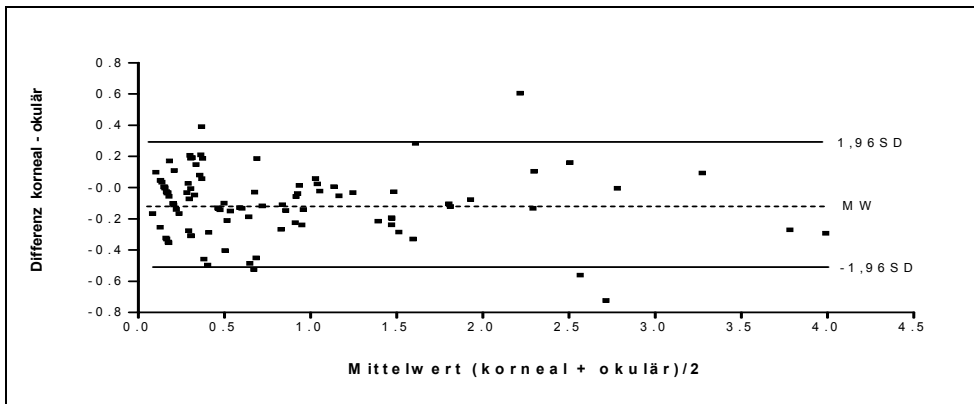


Abb. 30: Bland-Altman-Diagramm für Wellenfrontfehler (RMS 3)

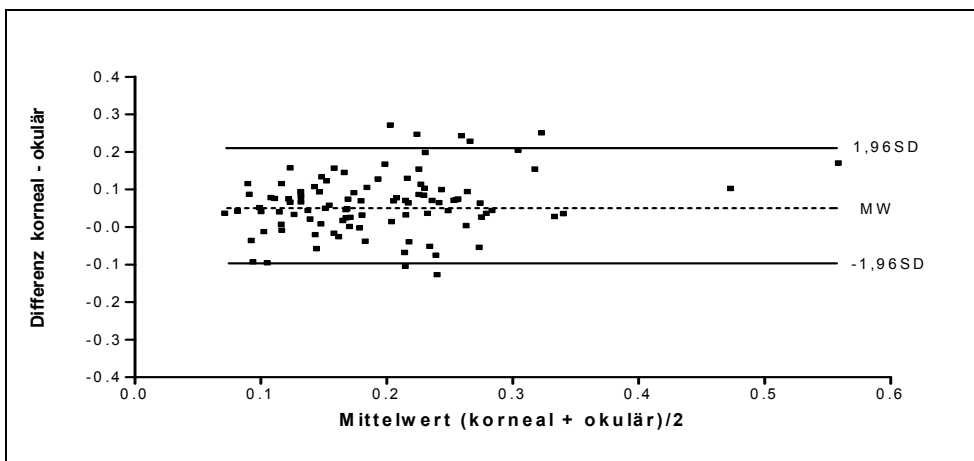
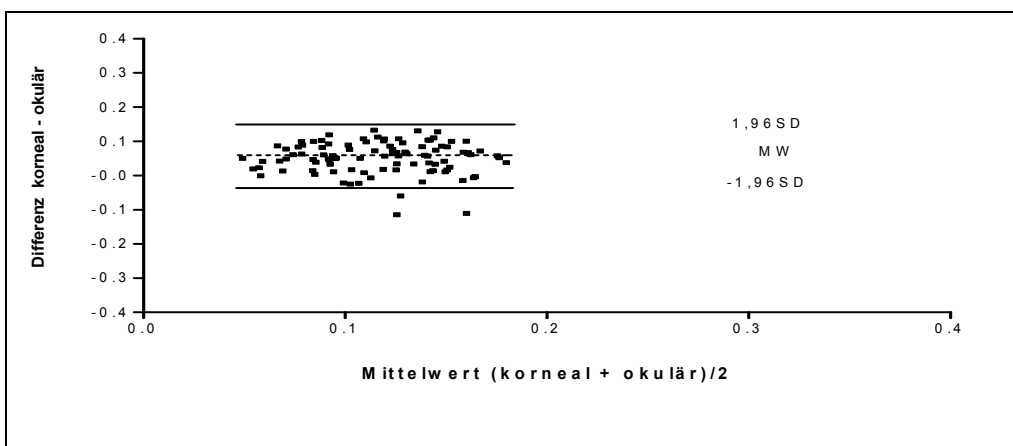


Abb. 31: Bland-Altman-Diagramm für Wellenfrontfehler (RMS 4)



3.5 Korneale und okuläre Aberrationen in Abhängigkeit vom Alter

3.5.1 Altersabhängige Verteilung der kornealen und okulären Aberrationen

Die Mittelwerte zwischen beiden Altersgruppen unterschieden sich bis auf C07 (Koma) und C12 (sphärische Aberration) nicht. Mit dem Alter wurden die kornealen und okulären Werte für C07 negativer, okulär für C12 positiver (Abb. 32 bis 35).

Abb. 32: Koeffizienten C03-C14
Alter < 45 Jahre (korneal)

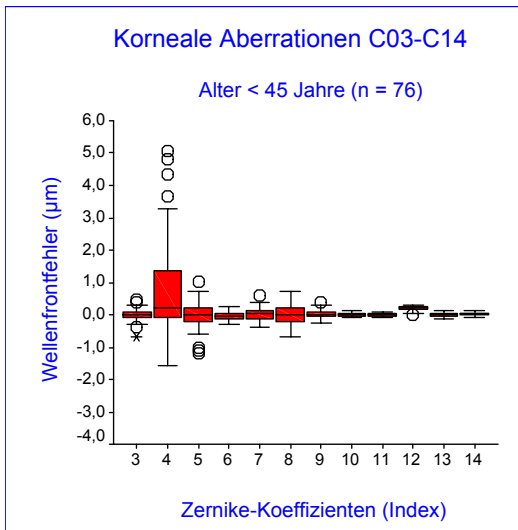


Abb. 33: Koeffizienten C03-C14
Alter \geq 45 Jahre (korneal)

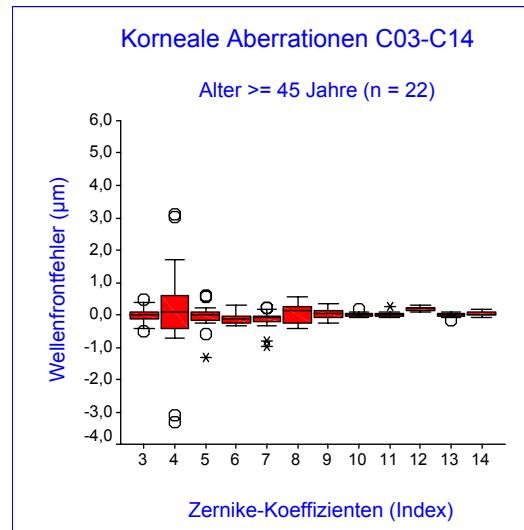


Abb. 34: Koeffizienten C03-C14
Alter < 45 Jahre (okulär)

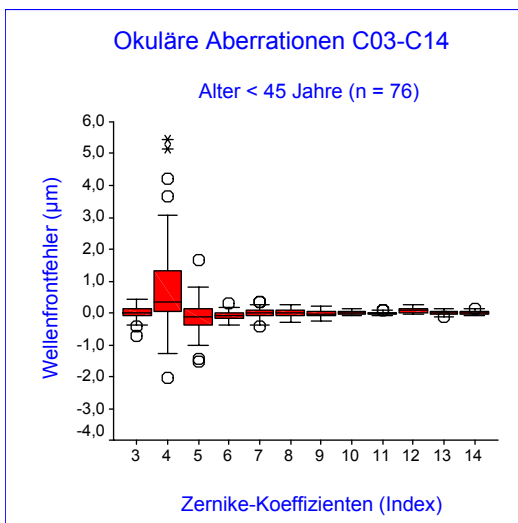
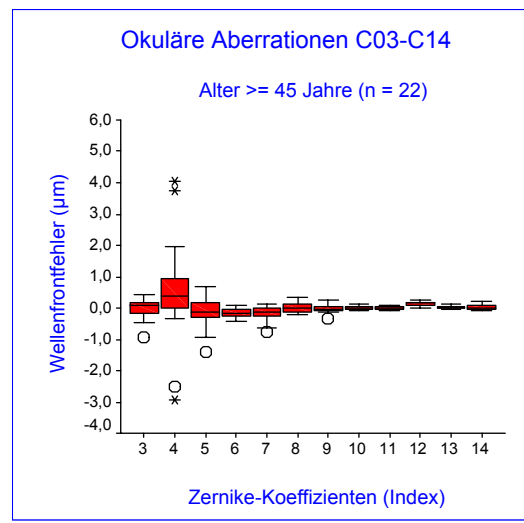


Abb. 35: Koeffizienten C03-C14
Alter \geq 45 Jahre (okulär)



Beim Vergleich der RMS-Wellenfrontfehler höherer Ordnung zeigten sich tendenziell korneal und okulär höhere Aberrationen bei den älteren Probanden (Abb. 36 bis 39).

Abb. 36: Wellenfrontfehler (RMS 2-4)
Alter < 45 Jahre (korneal)

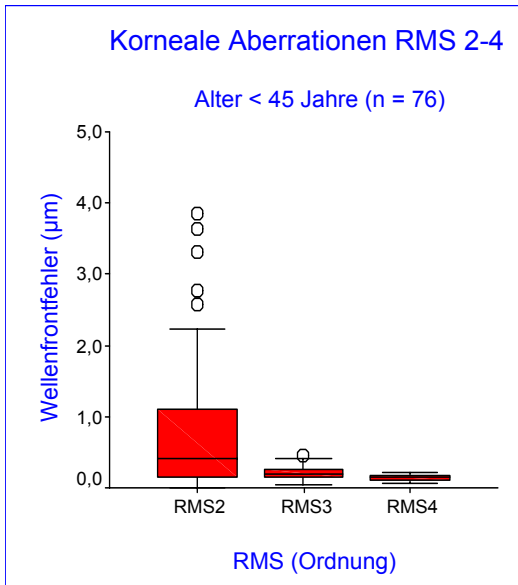


Abb. 37: Wellenfrontfehler (RMS 2-4)
Alter \geq 45 Jahre (korneal)

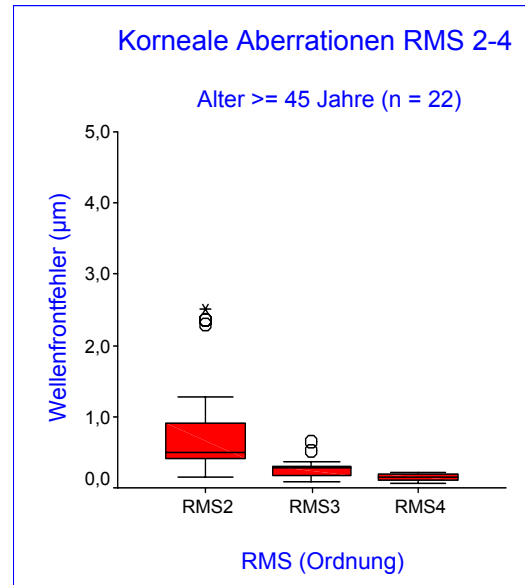


Abb. 38: Wellenfrontfehler (RMS 2-4)
Alter < 45 Jahre (okulär)

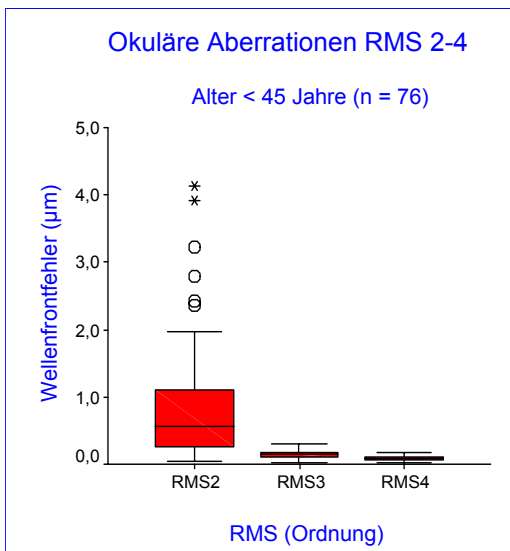
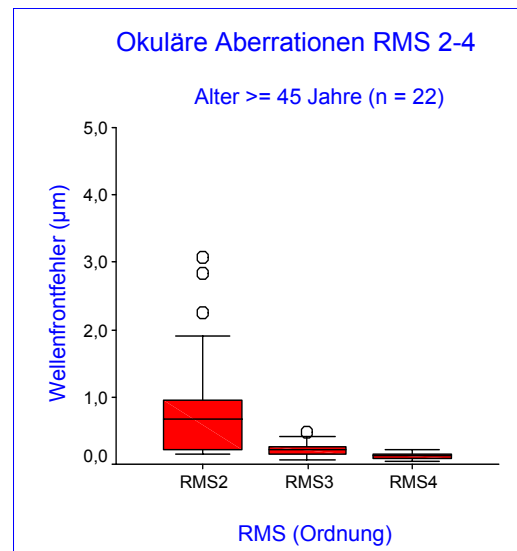


Abb. 39: Wellenfrontfehler (RMS 2-4)
Alter \geq 45 Jahre (okulär)



Zusammengefaßt war für den RMS okulär ein Anstieg der Fehler der 3. Ordnung, besonders Koma horizontal sowie die Fehler der 4. Ordnung, einschließlich der sphärischen Aberration, mit dem Alter festzustellen.

3.5.2 Vergleich der Korrelationen zwischen beiden Altersgruppen

In der Altersgruppe der Probanden jünger als 45 Jahre ergaben sich nach Spearman, mit Ausnahme von Koma vertikal C08 und Vierblatt C14, signifikante Korrelationen im Bereich von $r = 0,56$ (sphärische Aberration) bis $r = 0,91$ (Defokus) (Tabelle 12). Hervorzuheben sind in der älteren Gruppe die signifikanten Korrelationen beider Koma-Aberrationen C07 ($r = 0,81$) und C08 ($r = 0,83$). Bei der sphärischen Aberration C12 wurden sowie auch für C13 und C14, keine Korrelation nachgewiesen (Tabelle 12).

Während bei den jüngeren Probanden signifikante Korrelationen für die RMS-Wellenfrontfehler aller Ordnungen erkennbar waren, konnten bei den Älteren keine Korrelation der RMS-Fehler der 4. Ordnung gefunden werden (Tabelle 12).

Tab. 12: Vergleich der korneal-okulären Korrelation beider Altersgruppen*

Aberration	Alter < 45 Jahre (n = 76)		Alter ≥ 45 Jahre (n = 22)	
	r (Spearman)	p < 0,05	r (Spearman)	p < 0,05
C03	0,67	<0,0001	0,60	0,0030
C04	0,91	<0,0001	0,95	<0,0001
C05	0,86	<0,0001	0,51	0,0160
C06	0,71	<0,0001	0,74	<0,0001
C07	0,61	<0,0001	0,81	<0,0001
C08	0,43	<0,0001	0,83	<0,0001
C09	0,72	<0,0001	0,80	<0,0001
C10	0,75	<0,0001	0,53	0,0110
C11	0,68	<0,0001	0,78	<0,0001
C12	0,56	<0,0001	-0,27	0,2320
C13	0,66	<0,0001	0,35	0,1150
C14	0,41	<0,0001	0,17	0,4430
RMS2	0,85	<0,0001	0,79	<0,0001
RMS3	0,39	0,0010	0,78	<0,0001
RMS4	0,51	<0,0001	-0,48	0,8320

*Innerhalb der jeweiligen Altersgruppe wurden zwischen den kornealen und okulären Aberrationen die Korrelationskoeffizienten (r) nach Spearman bei dem o.g. Signifikanzniveau (p) ermittelt

Die Korrelationen im Altersvergleich wurden für die Polynome C07/08 (Koma horizontal/vertikal) und C12 (sphärische Aberration) graphisch dargestellt (Abb. 40 - 45).

Abb. 40: Korrelation für Koeffizient C07
Alter < 45 Jahre (n = 76)

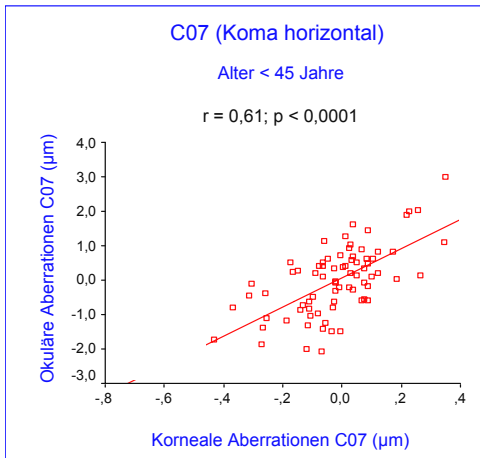


Abb. 41: Korrelation für Koeffizient C07
Alter \geq 45 Jahre (n = 22)

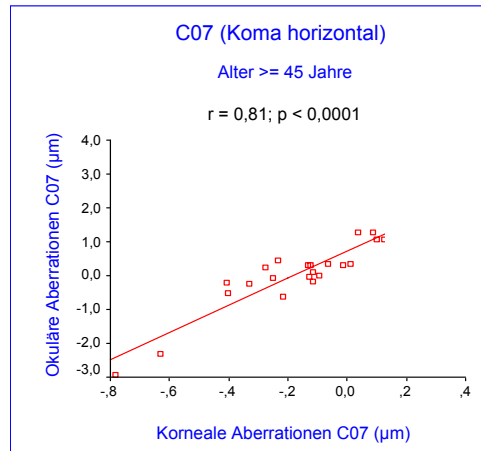


Abb. 42: Korrelation für Koeffizient C08
Alter < 45 Jahre (n = 76)

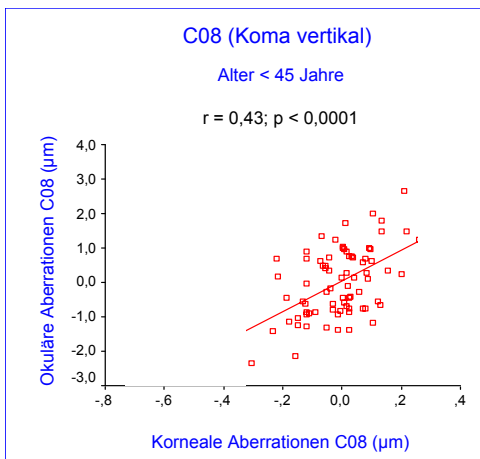


Abb. 43: Korrelation für Koeffizient C08
Alter \geq 45 Jahre (n = 22)

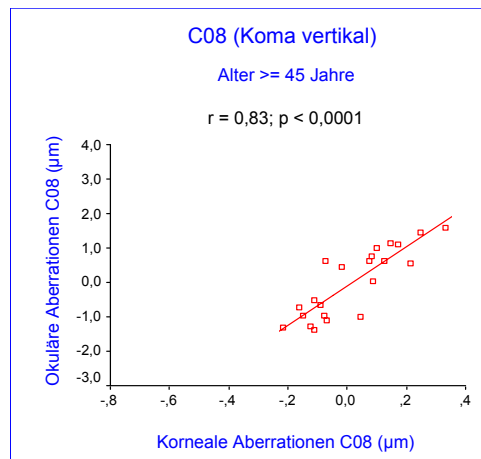


Abb. 44: Korrelation für Koeffizient C12
Alter < 45 Jahre (n = 76)

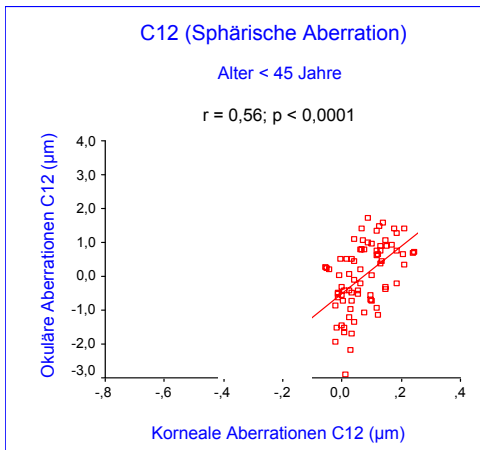
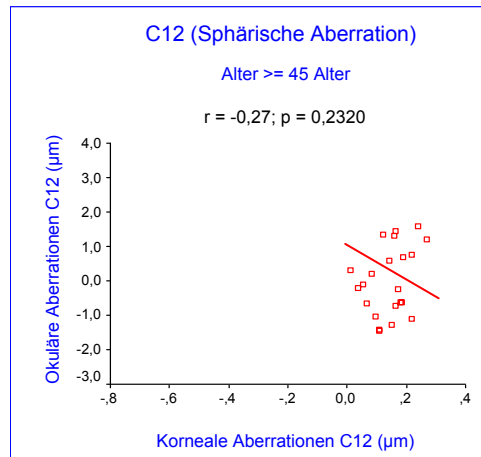


Abb. 45: Korrelation für Koeffizient C12
Alter \geq 45 Jahre (n = 22)



3.5.3 Korneale und okuläre Differenzen zwischen beiden Altersgruppen

Korneal fanden sich keine signifikanten Unterschiede ($p' > 0,004$) zwischen beiden Altersgruppen. Jedoch konnten okulär signifikante Differenzen für Koma horizontal C07 ($-0,019 \mu\text{m}$ vs. $-0,179 \mu\text{m}$; $p' = 0,002$) sowie für die mittlere sphärische Aberration C12 ($0,074 \mu\text{m}$ vs. $0,142 \mu\text{m}$; $p' = 0,0001$) zwischen beiden Gruppen nachgewiesen werden. Dies entsprach einer 10 fachen Änderung bei Koma und einem 2 fachen Anstieg der sphärischen Aberration im Alter (Tabelle 13).

Während bezüglich der RMS-Wellenfrontfehler höherer Ordnung korneal keine signifikanten Differenzen auftraten, konnten okulär auf Grund des Einflusses von Koma und sphärische Aberration signifikante Unterschiede verifiziert werden (Tabelle 13).

Tab. 13: Vergleich der kornealen und okulären Aberrationen beider Altersgruppen mittels Mann-Whitney-U-Test für unabhängige Stichproben*

Aberration	Korneale Aberrationen				Okuläre Aberrationen			
	< 45 Jahre		≥ 45 Jahre		< 45 Jahre		≥ 45 Jahre	
	(n = 76)	(n = 22)	Differenz	MWU-Test (2-seitig)	(n = 76)	(n = 22)	Differenz	MWU-Test (2-seitig)
	MW	MW	MW	$p' < 0,004$	MW	MW	MW	$p' < 0,004$
C03	-0,003	-0,004	-0,001	0,9760	0,0028	-0,0271	-0,030	0,8580
C04	0,745	0,110	-0,635	0,0920	0,7962	0,4557	-0,340	0,5010
C05	-0,036	-0,083	-0,046	0,6080	-0,1330	-0,1017	0,031	0,5070
C06	-0,060	-0,108	-0,048	0,0920	-0,0796	-0,1682	-0,089	0,0120
C07	0,013	-0,155	-0,167	0,0110	-0,0186	-0,1793	-0,161	0,0020
C08	-0,005	0,032	0,037	0,6580	-0,0094	0,0196	0,029	0,5290
C09	0,016	0,024	0,007	0,7660	-0,0247	-0,0146	0,010	0,7590
C10	0,007	0,004	-0,003	0,5400	0,0042	0,0072	0,003	0,7080
C11	0,004	0,012	0,008	0,7850	-0,0019	0,0078	0,010	0,3950
C12	0,190	0,188	-0,002	0,8180	0,0738	0,1422	0,068	0,0000
C13	-0,013	-0,005	0,008	0,4800	-0,0015	0,0157	0,017	0,2300
C14	0,023	0,027	0,004	0,9250	0,0093	0,0258	0,017	0,7110
RMS2	0,768	0,825	0,057	0,2790	0,8690	0,9021	0,033	0,9930
RMS3	0,211	0,275	0,063	0,0150	0,1463	0,2242	0,078	0,0010
RMS4	0,141	0,145	0,004	0,7720	0,0825	0,1190	0,037	0,0000

*aus den kornealen und okulären Mittelwerten (C03-C14 und RMS-Fehler) wurden die zwischen den Altersklassen gebildeten Differenzen mittels Mann-Whitney-U-Test (MWU) auf signifikante Unterschiede getestet

3.6 Aberrationen in Abhängigkeit von Ametropie und Emmetropie

3.6.1 Refraktionsabhängiger Vergleich kornealer und okulärer Aberrationen

Allgemein konnte festgehalten werden, daß bei den Emmetropen die geringsten kornealen und okulären Aberrationen auftraten. Die RMS-Wellenfrontfehler aller Ordnungen waren stets kleiner als die der Ametropen.

Die Hyperopen zeigten im Vergleich mit den übrigen Gruppen höhere korneale und okuläre Aberrationen.

Während bei den Normalsichtigen die Fehler der höheren Ordnung dominierten, überwogen bei den fehlsichtigen Probanden die Fehler der niedrigen Ordnung (Abb. 46 bis 51).

Beim Vergleich der einzelnen Zernike-Polynome ergab sich für Defokus C04 bei den Emmetropen eine korneale Aberration um Null ($-0,001 \mu\text{m}$) sowie okulär $0,115 \mu\text{m}$ (Abb. 46 und 47).

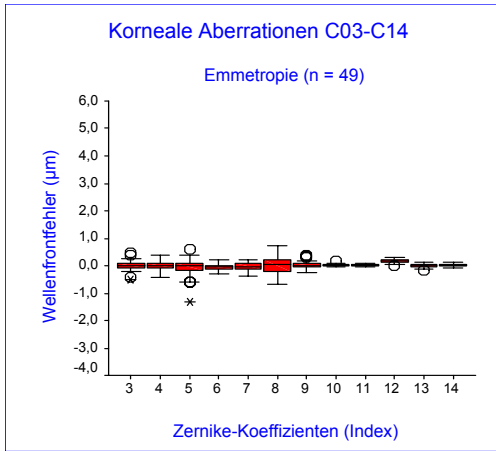
Für die Myopen zeigten sich deutliche korneal-okulär positive Werte ($1,731 \mu\text{m}$ vs. $1,832 \mu\text{m}$) (Abb. 48 und 49).

Bei den Hyperopen waren ähnliche, aber negative Abweichungen ($-1,432 \mu\text{m}$ vs. $-1,276 \mu\text{m}$) festzustellen (Abb. 50 und 51).

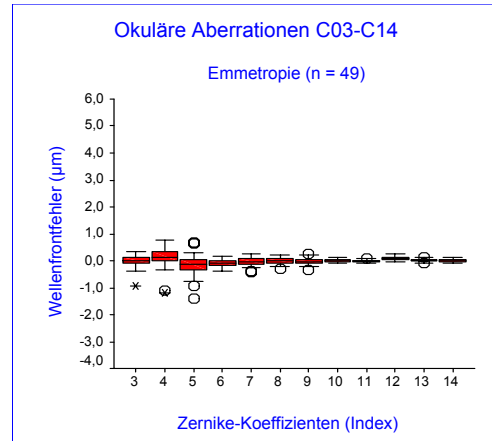
Die Koma Aberrationen C07 und C08 zeigten bei den Hyperopen im Vergleich zu den anderen Gruppen eine besonders große Streuung der Werte.

Hinsichtlich der sphärischen Aberration C12 erschien der Betrag korneal zwischen allen drei Gruppen gleich groß. Okulär jedoch grenzten sich die Hyperopen deutlich von den beiden anderen Gruppen ab. Die Normal- und Kurzsichtigen wiesen nur die Hälfte vom Betrag der kornealen sphärische Aberration auf ($0,182 \mu\text{m}$ vs. $0,082 \mu\text{m}$ bzw. $0,197 \mu\text{m}$ vs. $0,081 \mu\text{m}$) (Abb. 46 bis 51).

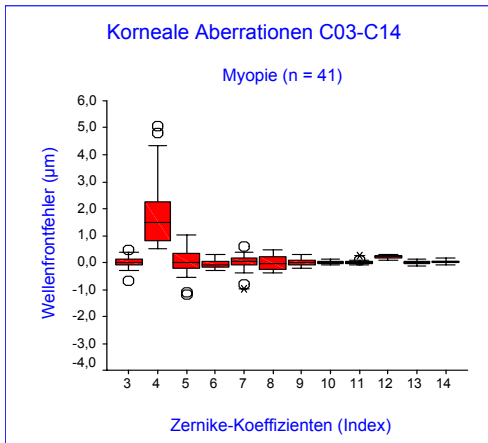
**Abb. 46: Koeffizienten C03-C14
Emmetropie (korneal)**



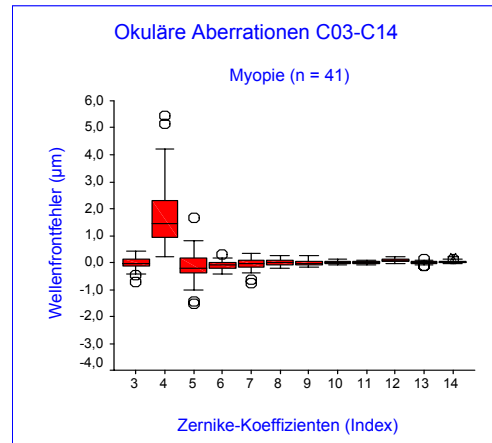
**Abb. 47: Koeffizienten C03-C14
Emmetropie (okulär)**



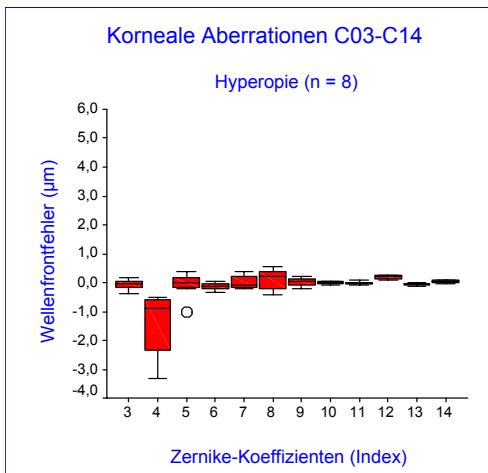
**Abb. 48: Koeffizienten C03-C14
Myopie (korneal)**



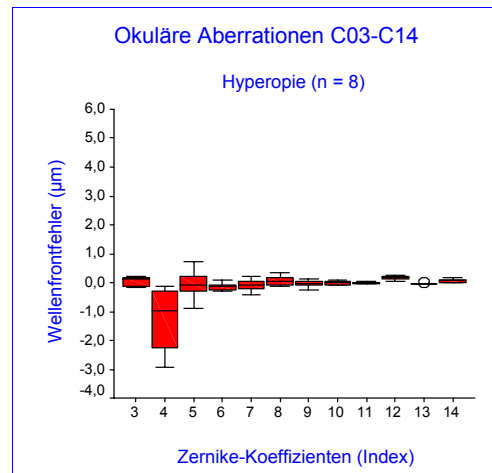
**Abb. 49: Koeffizienten C03-C14
Myopie (okulär)**



**Abb. 50: Koeffizienten C03-C14
Hyperopie (korneal)**



**Abb. 51: Koeffizienten C03-C14
Hyperopie (okulär)**



3.6.2 Vergleich der Korrelationen zwischen Myopie, Hyperopie, Emmetropie

Für emmetrope Augen erwiesen sich signifikante Korrelationen nach Spearman mit Korrelationskoeffizienten im Bereich von $r = 0,57$ (C12 sphärische Aberration) bis $r = 0,82$ (C09 Dreiblatt). Keine signifikanten Korrelationen wurden für die Polynome Koma vertikal C08 und Vierblatt C14 gefunden. Im Vergleich zu den Myopen sind die signifikanten Korrelationen der sphärischen Aberration C12 der Emmetropen hervorzuheben. Für die Hyperopen wurden auf Grund der geringen Fallzahl weniger signifikante Korrelationen nachgewiesen.

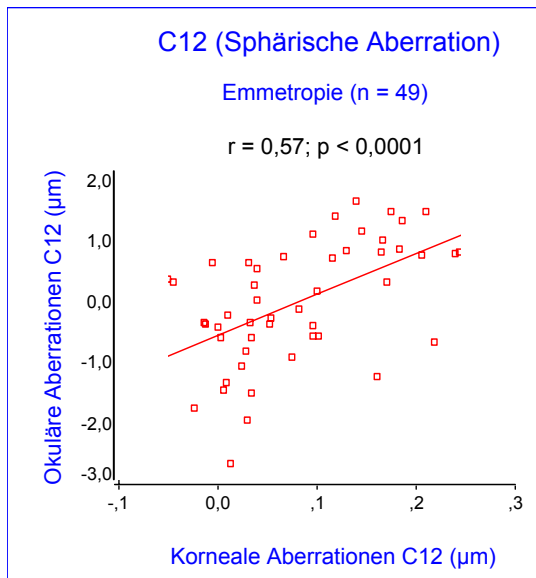
Der größte Unterschied zwischen den drei Gruppen zeigte sich bei der sphärischen Aberration C12. Allgemein waren bei den Ametropen schwache bis fehlende Korrelationen der kornealen und okulären Aberrationen der 4. Ordnung festzustellen (Tabelle 14).

Tab. 14: Vergleich der Korrelation aller Fehlsichtigkeitsgruppen

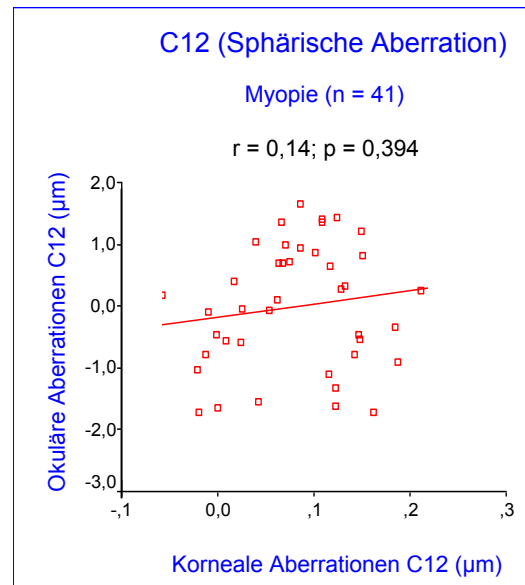
Aberration	Emmetropie (n = 49)		Myopie (n = 41)		Hyperopie (n = 8)	
	Spearman	p < 0,05	Spearman	p < 0,05	Spearman	p < 0,05
C03	0,637	<0,0001	0,618	<0,0001	0,886	0,0030
C04	0,536	<0,0001	0,966	<0,0001	0,755	0,0310
C05	0,727	<0,0001	0,861	<0,0001	0,635	0,0910
C06	0,683	<0,0001	0,795	<0,0001	0,690	0,0580
C07	0,655	<0,0001	0,789	<0,0001	0,929	0,0010
C08	0,360	0,0110	0,608	<0,0001	0,810	0,0150
C09	0,820	<0,0001	0,667	<0,0001	0,619	0,1020
C10	0,613	<0,0001	0,717	<0,0001	0,714	0,0470
C11	0,698	<0,0001	0,792	<0,0001	0,476	0,2330
C12	0,571	<0,0001	0,137	0,394	-0,333	0,4200
C13	0,694	<0,0001	0,506	0,001	0,643	0,0860
C14	0,293	0,0410	0,386	0,013	0,238	0,5700
RMS2	0,352	0,0130	0,973	<0,0001	0,755	0,0310
RMS3	0,513	<0,0001	0,539	<0,0001	0,286	0,4930
RMS4	0,612	<0,0001	0,107	0,507	-0,310	0,4560

Die unterschiedlichen Zusammenhänge wurden am Beispiel sphärischer Aberrationen nachfolgend für Emmetropie und Myopie graphisch dargestellt (Abb. 52 und 53).

**Abb. 52: Korrelation für Koeffizient C12
Emmetropie (n = 49)**



**Abb. 53: Korrelation für Koeffizient C12
Myopie (n = 41)**



3.6.3 Korneale und okuläre Differenzen zwischen Emmetropie und Ametropie

Die Differenzanalyse ergab bezogen auf C04 (Defokus) signifikante Unterschiede zwischen den einzelnen Gruppen (Tabelle15).

Bezüglich der Polynome C03 (schräger Astigmatismus) und C05 (Astigmatismus mit bzw. gegen die Regel) waren sowohl korneal als auch okulär keine signifikanten Differenzen zu finden.

Für die Koma-Aberrationen C07 und C08 ließen sich ebenfalls korneal und okulär keine signifikanten Unterschiede zwischen den einzelnen Gruppen nachweisen (Tabelle15).

Die Differenz okulärer sphärischer Aberrationen C12 der Hyperopen waren gegenüber den Emmetropen und Myopen signifikant. Zusätzlich wurde auch ein im Vergleich mit den Emmetropen signifikanter Unterschied beim sekundären Astigmatismus C13 sowie der RMS-Fehler der 4. Ordnung festgestellt (Tabelle15).

Tab. 15: Vergleich der Aberrationen zwischen Emmetropie, Myopie und Hyperopie mittels T-Test für unabhängige Stichproben

Aberration	Emmetropie versus Myopie				Emmetropie versus Hyperopie				Myopie versus Hyperopie			
	korneal		okulär		korneal		okulär		korneal		okulär	
	Mittlere Differenz	T-Test (2-seitig) p' < 0,004	Mittlere Differenz	T-Test (2-seitig) p' < 0,004	Mittlere Differenz	T-Test (2-seitig) p' < 0,004	Mittlere Differenz	T-Test (2-seitig) p' < 0,004	Mittlere Differenz	T-Test (2-seitig) p' < 0,004	Mittlere Differenz	T-Test (2-seitig) p' < 0,004
C03	-0,008	0,7230	-0,002	0,7180	-0,064	0,33208	0,055	0,5350	-0,072	0,2890	0,053	0,5520
C04	-1,740	0,0000	-1,716	0,0000	-1,422	0,0000	-1,391	0,0000	-3,162	0,0000	-3,108	0,0000
C05	-0,110	0,2430	-0,055	0,7670	0,009	0,6590	0,086	0,5350	-0,101	0,7250	0,031	0,7450
C06	-0,004	0,8300	0,012	0,8620	-0,075	0,1240	-0,054	0,1610	-0,079	0,1600	-0,042	0,3300
C07	-0,038	0,1210	0,044	0,3750	0,064	0,7130	-0,051	0,4480	0,026	0,8920	-0,007	0,8080
C08	0,016	0,7250	-0,002	0,8430	0,107	0,3350	0,065	0,3010	0,123	0,3440	0,063	0,3720
C09	-0,011	0,7610	-0,007	0,8170	0,016	0,5500	-0,024	0,7830	0,005	0,8080	-0,031	0,7450
C10	0,008	0,7550	-0,002	0,7000	-0,013	0,6790	-0,014	0,5200	-0,006	0,7870	-0,016	0,4990
C11	0,007	0,0770	0,001	0,9710	-0,032	0,0330	-0,019	0,1900	-0,024	0,1370	-0,018	0,2560
C12	-0,016	0,2450	0,001	0,8170	0,013	0,5660	0,094	0,0040	-0,002	0,9780	0,095	0,0030
C13	0,005	0,5350	0,020	0,1040	-0,056	0,0130	-0,054	0,0000	-0,051	0,0048	-0,034	0,0270
C14	-0,007	0,6940	-0,016	0,2060	0,025	0,2600	0,066	0,0090	0,018	0,3580	0,051	0,0620
RMS2	-1,136	0,0000	-1,133	0,0000	0,888	0,0000	0,679	0,0270	-0,247	0,3720	-0,454	0,2670
RMS3	-0,020	0,3770	-0,037	0,0880	0,059	0,0240	0,055	0,0290	0,039	0,2240	0,018	0,3300
RMS4	-0,014	0,0940	-0,002	0,6760	0,013	0,5200	0,055	0,003	-0,001	0,9460	0,053	0,0050

Während sich keine signifikanten korneal-okulären Unterschiede bei den hyperopen Probanden nachweisen ließen, fanden sich signifikante korneal-okuläre Differenzen bei den Emmetropen und Myopen für die Polynome sphärische Aberrationen C12 (jeweils $p' < 0,0001$) und für Polynom C09 ($p' = 0,0005$ bzw. $p' = 0,0022$) sowie bei den RMS-Fehlern aller Ordnungen. Die Emmetropen unterschieden sich von den Myopen hinsichtlich einer zusätzlich signifikanten Differenz beim sekundärem Astigmatismus C13 ($p' = 0,0025$).

3.7 Korrelation zwischen rechten und linken Augen

Das besondere Interesse galt hierbei jedem einzelnen Zernike-Koeffizienten. Auf die Darstellung der RMS-Wellenfrontfehler wurde verzichtet, da die Bedeutung spezieller Polynome nicht sichtbar genug wurde.

Wie aus den Tabellen 16 und 17 ersichtlich, korrelierten die rechten mit den linken Augen korneal und okulär signifikant. Wegen der unterschiedlichen Achsenlagen gab es beim Astigmatismus C03 und sekundärer Astigmatismus C11 keine Korrelation.

Negative Korrelationen fanden sich bei Astigmatismus C03 und Polynome C08 bis C11 (Tabelle 16 und 17).

Tab. 16: Korrelation kornealer Polynome zwischen rechtem und linkem Auge

Aberration	RA		LA		r (Pearson)	p < 0,05	
	Korneal	MW	SD	MW			SD
C03		0,014	0,170	-0,020	0,194	-0,21	0,1519
C04		0,654	1,350	0,551	1,331	0,95	0,0000
C05		-0,050	0,356	-0,043	0,434	0,69	0,0000
C06		-0,072	0,128	-0,070	0,126	0,73	0,0000
C07		-0,041	0,231	-0,009	0,220	0,90	0,0000
C08		-0,227	0,159	0,234	0,175	-0,79	0,0000
C09		-0,006	0,130	0,042	0,123	-0,62	0,0000
C10		0,026	0,045	-0,014	0,040	-0,59	0,0000
C11		-0,004	0,052	0,015	0,029	-0,26	0,0685
C12		0,188	0,062	0,191	0,062	0,75	0,0000
C13		-0,005	0,058	-0,017	0,066	0,75	0,0000
C14		0,017	0,059	0,030	0,049	0,58	0,0000

Abgesehen von Defokus C04 fanden sich die stärksten Korrelationen korneal bei Koma horizontal C07 (r = 0,90), Koma vertikal C08 (r = -0,79) sowie bei sphärischer

Aberration C12 ($r = 0,75$) und sekundärem Astigmatismus C13 ($r = 0,75$) (Tabelle 16).

Okulär wurde auch für Koma horizontal C07 ($r = 0,89$) der größte Korrelationskoeffizient bestimmt, gefolgt von sphärischer Aberration C12 ($r = 0,88$) und Koma vertikal C08 ($r = -0,75$) (Tabelle 17).

Die Aberrationen korrelierten zwischen den beiden Augen okulär besser als korneal. (Tabelle 16 und 17).

Tab. 17: Korrelation okulärer Polynome zwischen rechtem und linkem Auge

Aberration Okulär	RA		LA		r (Pearson)	p < 0,05
	MW	SD	MW	SD		
C03	0,059	0,177	-0,067	0,261	-0,26	0,0671
C04	0,738	1,387	0,702	1,371	0,93	0,0000
C05	-0,098	0,439	-0,154	0,516	0,71	0,0000
C06	-0,092	0,128	-0,107	0,137	0,69	0,0000
C07	-0,063	0,188	-0,047	0,180	0,89	0,0000
C08	-0,050	0,102	0,044	0,121	-0,75	0,0000
C09	-0,025	0,108	-0,020	0,108	-0,71	0,0000
C10	0,035	0,045	-0,025	0,040	-0,67	0,0000
C11	-0,010	0,037	0,011	0,036	-0,34	0,0155
C12	0,085	0,076	0,093	0,078	0,88	0,0000
C13	0,008	0,053	-0,003	0,047	0,69	0,0000
C14	0,019	0,054	0,007	0,055	0,56	0,0000